



Análise da Evolução Tecnológica na Área de Armazenamento de Energia Elétrica

Ana Sofia Pereira dos Santos

Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

Dissertação orientada por:
Doutor José Almeida Silva (FCUL)
Doutor Sandro Mendonça (ISCTE)

Agradecimentos

Agradeço a ambos os meus orientadores, Doutor José Silva e Doutor Sandro Mendonça, pela paciência, motivação e todas as sugestões durante a realização desta dissertação.

Um grande agradecimento também aos meus familiares, em especial aos meus pais e à minha tia, não só pelo apoio e carinho (sem os quais este percurso teria sido muito mais turbulento) mas também pela oportunidade que me ofereceram em frequentar este curso.

E finalmente aos meus amigos pela constante paciência e pela ajuda nos momentos difíceis, em especial ao Michael Enescu, Miguel Rodrigues, André Gaspar e Daniel Oliveira pela motivação, pelas sugestões e conversas, que enriqueceram esta dissertação.

A todos um muito obrigada!

Resumo

O armazenamento de energia elétrica (AEE) é um assunto que tem ganho importância com o aumento do consumo energético e a crescente necessidade de integrar energia renovável (ER) intermitente não controlável no *mix* energético. Porém, as tecnologias AEE existentes atualmente ainda não possuem as características técnico-econômicas adequadas para que sejam utilizadas numa multiplicidade de atividades em diferentes locais geográficos a baixo custo. Isto leva a que, por vezes, seja economicamente benéfico parar a produção de ER em vez de a armazenar ou, em outros casos, utilizar combustíveis fósseis para preencher o diagrama de carga, em alturas de elevado consumo. Contudo, a urgência em reduzir substancialmente as emissões de gases efeito de estufa reflete a necessidade da crescente utilização de ER e, consequentemente, o desenvolvimento de alternativas de AEE com elevado potencial para evolução tecnológica.

No presente trabalho propõe-se que as tecnologias AEE sejam avaliadas com recurso a quatro parâmetros, elencados com o intuito de identificar e quantificar o potencial de evolução e sucesso de cada tecnologia estudada – *competitividade* (relação e tendência entre custo e nível de desenvolvimento), *escalabilidade* (limites de capacidade de armazenamento de energia e potência), *versatilidade* (variedade de campos de aplicação em que a tecnologia se pode inserir) e *replicabilidade* (independência das condições geográficas e meteorológicas do local onde é inserida).

Conclui-se que, embora atualmente a tecnologia com mais sucesso em aplicações estacionárias seja a bombagem devido ao seu elevado índice de escalabilidade e competitividade, o seu baixo índice nos restantes indicadores abre espaço para que determinadas tecnologias (baterias de fluxo e metal líquido) se tornem mais bem-sucedidas, devido ao seu elevado índice em todos os parâmetros. Para aplicações móveis, o baixo índice de competitividade e escalabilidade de baterias de ião de lítio, obriga à sua melhoria ou à procura de novas tecnologias com elevados índices nestes parâmetros.

Palavras-Chave: Armazenamento de energia, energias renováveis, potencial para evolução tecnológica, baterias de metal líquido, baterias de fluxo.

Abstract

Electrical energy storage (EES) has garnered much attention lately as a result of both rising energy consumption, and the increasing need to integrate variable renewable energy (RE) into the energy mix. Despite this, there remain unresolved issues in EES. Specifically, existing EES technologies do not possess site-versatility, instead requiring specific site locations. Moreover, they do not exhibit a high degree of economic viability. Consequently, energy producers are forced to sometimes curtail their RE production instead of storing any resulting surplus. At other times, producers employ the use of fossil fuels in order to meet peak energy demand. However, these measures are fundamentally at odds with the urgent need to substantially reduce greenhouse gas emissions. Indeed, these measures highlight the importance of renewable energy sources, and of the development of EES technologies exhibiting a high potential for technological evolution.

The work described in this document proposes that EES technologies be evaluated using four parameters which aim to quantify the technologies' potential for evolution and economic success: *competitiveness* (relationship between cost and technological maturity), *scalability* (maximum and minimum amount of energy possible to deliver), *versatility* (amount of variety in application fields in which the technology can be used), and *replicability* (degree of independence in the technology's performance, relative to the geographical and meteorological characteristics of its intended location).

As starting point, it was shown that currently the most successful EES technology for stationary applications is pumped-hydro, largely due to their high scalability and competitiveness. However, their low replicability and versatility provide an opening for other technologies with high values in these parameters (such as flow batteries and liquid metal batteries), to become more successful. Similarly, in mobile applications, the low competitiveness and scalability of lithium-ion batteries pressures their improvement or the search for other EES technologies with high values in these parameters.

Keywords: Energy storage, renewable energies, potential for technological evolution, liquid metal batteries, redox-flow batteries

Índice

Agradecimentos.....	iii
Resumo.....	v
Abstract	vii
Índice de Figuras	xi
Índice de Tabelas.....	xiii
Simbologia e Notações.....	xv
1 Introdução	1
1.1 Contextualização	1
1.2 Enquadramento e objetivos	2
1.3 Estrutura do documento	3
2 Estado da arte	5
2.1 Classificação de sistema de armazenamento.....	5
2.2 Sistemas mecânicos.....	5
2.2.1 Bombagem	6
2.2.2 Sistemas de ar comprimido	8
2.2.3 Volante de inércia.....	11
2.3 Sistemas elétricos	13
2.3.1 Condensadores e supercondensadores.....	13
2.3.2 Supercondutores magnéticos.....	15
2.4 Sistemas químicos.....	15
2.4.1 Células de combustível e produção de hidrogénio	16
2.5 Sistemas eletroquímicos	18
2.5.1 Baterias secundárias	18
2.5.2 Baterias de fluxo.....	24
2.6 Sistemas térmicos.....	25
2.7 Conclusões preliminares	25
3 Características operacionais e campos de aplicação	27
3.1 Campos de aplicação.....	27
3.2 Tecnologias para aplicações estacionárias	31
3.2.1 Tecnologias AEE para gestão de energia	32
3.2.2 Tecnologias AEE para controlo de qualidade de energia.....	34
3.2.3 Tecnologias AEE para integração de renováveis	35
3.3 Tecnologias AEE móveis	39
3.4 Conclusões preliminares	43
4 Potencial para evolução e sucesso tecnológico	45
4.1 Proposta de indicadores de potencial para evolução tecnológica.....	45
4.1.1 Competitividade	46

4.1.2	Escalabilidade.....	51
4.1.3	Replicabilidade.....	53
4.1.4	Versatilidade.....	56
4.2	Análise integrada de resultados.....	59
4.2.1	Análise de cenário base.....	59
4.2.2	Proposta de cenário alternativo	63
4.3	Conclusões preliminares	64
5	Conclusões	67
5.1	Síntese do estudo.....	67
5.2	Trabalho futuro.....	68
6	Referências Bibliográficas	69
Anexos.....		75
A.1: Características operacionais utilizadas.....		75
A.2: Outras baterias eletroquímicas		77
A.3: ESOI da bateria de metal líquido para diferentes cenários.....		79
A.4: ESOI da tecnologia SMES para diferentes cenários		80

Índice de Figuras

Figura 1-1: Produção de energia eólica (azul), insolação (amarelo) e o consumo diário de energia (vermelho) ao longo de vários dias. Dados recolhidos durante os 30 dias de Abril de 2010. Valores médios mensais estão realçados com uma linha a preto entre duas linhas da respetiva cor, adaptado de [1].	2
Figura 2-1: Complementaridade hídrica-eólica [15].	8
Figura 2-2: Representação de uma central convencional de ar comprimido (diabático), adaptado de [3].	9
Figura 2-3: Esboço de um sistema de armazenamento de volante de inércia [24].	11
Figura 2-4: Gráfico da variação da frequência da rede isolada observando o efeito do volante de inércia [19].	12
Figura 2-5: Ilustração do interior de um SC, durante a sua carga, quando está completamente carregado e durante a sua descarga, adaptado de [30].	14
Figura 2-6: Ilustração esquemática das células de combustível discutidas tendo em conta as diferenças e semelhanças entre elas, adaptado de [36].	18
Figura 2-7: Comparação da eficiência ao longo da descarga de ambas as baterias ALAB e VRLA, adaptado de [41].	20
Figura 2-8: Comparação da capacidade da bateria e o tempo de vida (número de ciclos) de ambas as baterias ALAB e VRLA, adaptado de [41].	21
Figura 2-9: diagrama de uma bateria de metal líquido em modo de descarga (a) e carga (b), adaptado de [42].	21
Figura 2-10: Tabela periódica. Assinaladas as diferentes possibilidades de elétrodos negativos (amarelo) e positivos (verde) [42].	22
Figura 2-11: Diagrama de uma bateria de fluxo regenerativa [4].	24
Figura 3-1: Diferentes sistemas estacionários a estudar proposto pela dissertação.	31
Figura 3-2: Capacidade total instalada na rede elétrica a nível mundial de diferentes tecnologias de armazenamento de energia elétrica em diferentes campos de aplicação, adaptado de [62].	33
Figura 3-3: Competitividade dos diferentes tipos de veículos tendo em conta o preço da bateria e o preço do combustível, adaptado de [73]. O quadrado a verde indica a situação atual [74] e o quadrado a laranja indica uma aproximação da situação futura (~2020), tendo em conta possíveis desenvolvimentos tecnológicos dos sistemas AEE e a subida dos preços dos combustíveis fósseis [71].	39
Figura 3-4: Diferentes sistemas móveis a estudar, proposto pela dissertação.	40
Figura 3-5: Interior do veículo a ar comprimido [76].	41
Figura 3-6: Comparação da densidade de potência e energia para as diferentes tecnologias [2].	42
Figura 3-7: Comparação da potência e da energia específica das diferentes tecnologias [2].	42
Figura 4-1: Indicadores de sucesso tecnológico a explorar, propostos por esta dissertação.	45
Figura 4-2: O aumento da energia específica da bateria de íão de lítio e a descida do seu custo com o passar dos anos (análise entre 1991 e 2005). Adaptado de [78].	46
Figura 4-3: Projeções das descidas dos preços das baterias eletroquímicas por diferentes companhias[79]. A tracejado estão representadas as expetativas de redução.	47
Figura 4-4: Comparação do nível de desenvolvimento tecnológico e custo nivelado. Para efeitos de uma visualização mais detalhada retiraram-se as baterias NiCd e sistemas SMES devido ao custo muito elevado quando comparadas com as restantes tecnologias.	49
Figura 4-5: Peso dos diferentes indicadores num cenário base.	60

Figura 4-6: Índice de potencial para evolução tecnológica das tecnologias estudadas, num cenário base.....	60
Figura 4-7: Peso dos diferentes indicadores num cenário alternativo considerado por esta dissertação como mais realista.	63
Figura 4-8: Índice de potencial para evolução tecnológica das tecnologias estudadas, no cenário realista, de acordo com a proposta da dissertação.....	64

Índice de Tabelas

Tabela 2-1: Classificação dos diferentes tipos de armazenamento de energia.....	5
Tabela 3-1: Características operacionais das tecnologias de AEE a estudar.....	29
Tabela 3-2: Valores de ESOI das diferentes tecnologias de AEE indicadas e EROI da produção renovável.....	36
Tabela 3-3: Valores de ESOI/EROI e decisão mais benéfica de um ponto de vista de retorno de energia.....	37
Tabela 4-1: Proposta da classificação do nível de desenvolvimento, baseada nos TRL.....	47
Tabela 4-2: Custos e nível de desenvolvimento das tecnologias de armazenamento de energia a estudar.....	48
Tabela 4-3: Índice relativo de competitividade de acordo com a proposta da dissertação.	51
Tabela 4-4: Capacidades máximas e mínimas de potência e energia dos sistemas selecionados. ...	52
Tabela 4-5: Proposta de classificação de escalabilidade relativa.	52
Tabela 4-6: Índice relativo de escalabilidade de acordo com a proposta da dissertação.....	53
Tabela 4-7: Matriz de classificação da replicabilidade, proposta pela dissertação.	54
Tabela 4-8: Definição de níveis de classificação da replicabilidade, de acordo com a matriz apresentada.....	55
Tabela 4-9: Replicabilidade das tecnologias consideradas de acordo com a proposta da dissertação.	55
Tabela 4-10: Matriz de classificação da versatilidade, proposta pela dissertação.....	57
Tabela 4-11: Definição de níveis de classificação da versatilidade, de acordo com a matriz apresentada.....	57
Tabela 4-12: Classificação final da versatilidade de acordo com a proposta da dissertação.	58
Tabela 4-13: Síntese da informação dos indicadores de potencial tecnológico, utilizados no decorrer da dissertação.....	59

Simbologia e Notações

€	Euros
\$	Dólares americanos
ϕ	Fração de energia produzida em excesso
ε	Intensidade energética
η	Eficiência
λ	Número de ciclos de vida
AACAES	<i>Advanced Adiabatic Compressed Air Energy Storage</i>
AC	<i>Alternate Current</i>
ADELE	<i>Adiabate Druckluftspeicher für Die Elektrizitätsversorgung</i>
AEE	Armazenamento de Energia Elétrica
AFC	<i>Alkaline Fuel Cell</i>
ALAB	<i>Advanced Lead Acid Battery</i>
BNEF	<i>Bloomberg New Energy Finance</i>
CAES	<i>Compressed Air Energy Storage</i>
DC	<i>Direct Current</i>
DMFC	<i>Direct Methanol Fuel Cell</i>
DoD	<i>Depth of Discharge</i>
E_{\max}	Energia máxima armazenada
E_{\min}	Energia mínima armazenada
EDLC	<i>Electrical Double Layer Capacitor</i>
EDP	Energias de Portugal
ER	Energia Renovável
EROI	<i>Energy Return on Energy Investment</i>
ESOI	<i>Energy Stored on Electrical Energy Investment</i>
EV	<i>Electric Vehicle</i>
FC	<i>Fuel Cell</i>
FCEV	<i>Fuel Cell Electric Vehicle</i>
HEV	<i>Hybrid Electric Vehicle</i>
ICE	<i>Internal Combustion Engine</i>
IEA	<i>International Energy Agency</i>
I&D	Investigação e Desenvolvimento
LMBC	<i>Liquid Metal Battery Corporation</i>

MCFC	<i>Molten Carbonate Fuel Cell</i>
MIT	<i>Massachusetts Institute of Technology</i>
NaS	Sódio-Enxofre
NbTi	Titânio-nióbio
NiCd	Níquel-Cádmio
P_{\max}	Potência máxima
P_{\min}	Potência mínima
PAFC	<i>Phosphoric Acid Fuel Cell</i>
PEMFC	<i>Proton Exchange Membrane Fuel Cell</i>
PHEV	<i>Plug-in Hybrid Electric Vehicle</i>
PHS	<i>Pumped-Hydro Energy Storage</i>
PV	<i>Photovoltaic</i>
ReSOFC	<i>Reversible Solid-Oxide Fuel Cell</i>
SC	Supercondensador
SEI	<i>Sumitomo Electric Industries</i>
SMES	<i>Superconducting Magnetic Energy Storage</i>
SOFC	<i>Solid Oxide Fuel Cell</i>
TES	<i>Thermal Energy Storage</i>
TRL	<i>Technology Readiness level</i>
V2G	<i>Vehicle-to-grid</i>
VRB	<i>Vanadium Redox Battery</i>
VRLA	<i>Valve Regulated Lead Acid</i>
ZnBr	<i>Zinc-Bromine Redox Battery</i>

1 Introdução

Este capítulo pretende enquadrar o tema e os objetivos que a dissertação pretende atingir. Primeiramente será apresentado o contexto em que se insere o tema, é descrito o enquadramento do mesmo e ainda os seus objetivos. Por fim, será apresentada a estrutura da dissertação.

1.1 Contextualização

Económica, acessível, sustentável e de baixo teor em carbono; estas são algumas das palavras que caracterizam a energia do futuro. A nível mundial, a utilização racional da energia elétrica é um desafio com que a sociedade se depara [1]. Satisfazer a procura de energia no momento e local em que é necessária sob a forma mais adequada é difícil devido à variabilidade do consumo em diferentes escalas temporais. A inexistência de um equilíbrio perfeito entre o consumo e produção traz problemas de estabilidade e qualidade da fonte de energia. Adicionalmente, o crescimento populacional e a crescente intensidade de consumo, aumentam a variabilidade de consumo, sendo assim cada vez mais difícil equilibrar a produção com o consumo. Consequentemente, isto dá lugar a flutuações no preço da eletricidade ao longo do dia. Existem, essencialmente, três períodos com custo variável: os períodos de vazio, ponta e cheia¹. Durante as horas de ponta existe, muitas vezes, a necessidade de completar o diagrama de carga que, até aqui, era constituído por fontes de energia económicas, como por exemplo centrais a carvão, com fontes de energia menos económicas mas mais flexíveis, como por exemplo o gás natural, resultando num custo mais elevado da energia nestas alturas do dia. Durante as restantes horas, em especial as horas de vazio, quando o diagrama de carga é constituído por fontes de energia mais económicas, o preço da eletricidade é mais baixo.

Ao mesmo tempo, existe a necessidade de integrar a energia de origem renovável na rede elétrica para consumo. No entanto, a produção de energia por parte de fontes deste tipo é, em geral, intermitente e incontrolável, variando espacial e temporalmente. A Figura 1-1 permite verificar estes dois factos: em primeiro lugar, é possível verificar que a produção de ER está desfasada do consumo diário e, em segundo lugar, observa-se a variabilidade e intermitência desta produção.

¹ Os períodos de vazio são os períodos de menor consumo de energia durante os quais a energia é mais barata. Os períodos de ponta correspondem às alturas em que existe o maior consumo de energia. Assim a energia tende a ser mais cara nesta altura do dia para promover o consumo de energia em horas de vazio, de forma a promover a normalização do diagrama de carga. As horas de cheia são as restantes horas em que há elevado consumo de energia ainda que não sejam horas de ponta. A energia consumida durante os períodos de cheia é mais barata que a consumida em períodos de ponta mas mais cara que a consumida em períodos de vazio.

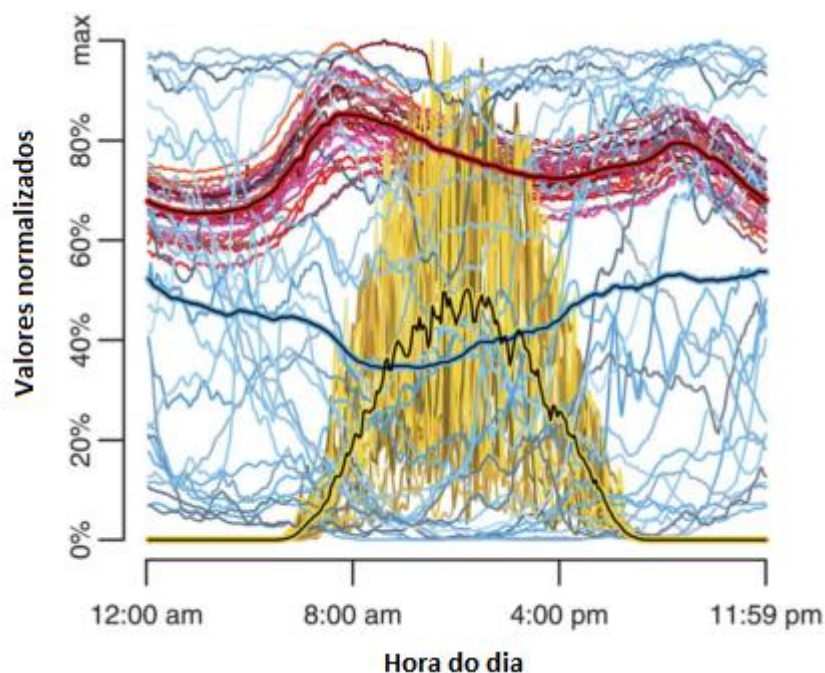


Figura 1-1: Produção de energia eólica (azul), insolação (amarelo) e o consumo diário de energia (vermelho) ao longo de vários dias. Dados recolhidos durante os 30 dias de Abril de 2010. Valores médios mensais estão realçados com uma linha a preto entre duas linhas da respetiva cor, adaptado de [1].

1.2 Enquadramento e objetivos

De forma a adequar às necessidades da rede, os operadores podem implementar diversas técnicas de equilíbrio de carga que aumentam a flexibilidade da rede elétrica. Um dos métodos utilizados é precisamente o armazenamento de energia [1, 2] .

No entanto, ainda que as tecnologias de armazenamento de energia elétrica (AEE) sejam variadas e possuam características variadas, nenhuma tecnologia de armazenamento possui as características adequadas para atuar em todos os campos de aplicação. Para determinadas aplicações, como por exemplo o transporte, é necessário ter em consideração a capacidade de armazenamento assim como a energia específica do sistema de armazenamento. Para outras aplicações, como por exemplo a gestão de energia, características como a capacidade de armazenamento ou o tempo de descarga são mais importantes. Existe assim, uma necessidade de definir não só as principais características que o sistema de armazenamento necessita para se adequar aos diversos campos de aplicação, mas também a necessidade de estudar os sistemas de armazenamento mais indicados para cada campo de aplicação.

Para além da grande variedade de tecnologias e campos de aplicação, a crescente introdução de energia produzida via fontes renováveis não controláveis (solar, eólica, etc.) na rede impõe dificuldades técnicas devido à sua intermitência. Embora a utilização de sistemas de AEE seja uma opção atrativa para a sua suavização, o custo de grande parte destas tecnologias de armazenamento é ainda muito elevado. Consequentemente, parar ou reduzir a produção de ER é, muitas vezes, uma opção mais económica que o armazenamento desta energia, quando existe excesso de produção. A

viabilidade económica de cada uma destas opções está dependente da intensidade energética² de ambos os sistemas de geração e armazenamento; tecnologias de geração com baixa intensidade energética (elevado retorno) necessitam de tecnologias de armazenamento com valores igualmente baixos de intensidade energética para que o valor de retorno da produção de energia se mantenha elevado [1].

Em particular, o estudo e comparação de índices de intensidade energética é especialmente importante para a análise de sistemas de armazenamento para locais remotos (*off-grid*). No geral, as diferenças entre estes valores são fundamentalmente importantes, pois refletem a necessidade de desenvolver tecnologias AEE com melhores características que permitam a sua viabilidade económica.

O principal foco desta dissertação será o de explorar, dentro das tecnologias de AEE consideradas, aquelas com maior potencial de sucesso no mercado para futuros investimentos. Para que tal seja possível, propõe-se o estudo de quatro indicadores de potencial para evolução: competitividade, escalabilidade, replicabilidade e versatilidade. Estes indicadores permitem a avaliação de tecnologias com características diferentes de forma justa. As tecnologias de AEE serão avaliadas para cada um destes parâmetros numa escala de 1 a 5. Tecnologias com elevados valores em ambos os parâmetros possuem elevado potencial para evolução tecnológica. Serão adicionalmente apresentados dois cenários: o primeiro, em que todos os indicadores possuem o mesmo peso na pontuação final de índice de potencial e o segundo, um cenário um tanto mais realista, em que se atribuem pesos diferentes, para que seja possível entender a importância da definição do peso de cada indicador e do seu impacto.

1.3 Estrutura do documento

No capítulo 2, é descrito o estado da arte das tecnologias de armazenamento mais importantes. No capítulo 3 analisam-se as características necessárias a cada campo de aplicação considerado e as tecnologias de armazenamento mais adequadas. O capítulo 4 expõe a metodologia da dissertação: em primeiro lugar são apresentados indicadores de potencial para evolução tecnológica; em segundo lugar, é feita a análise das tecnologias com estes indicadores de forma a concluir quais as tecnologias com maior potencial para desenvolvimento. Adicionalmente, neste capítulo são também apresentados dois cenários onde os indicadores estudados adotam pesos diferentes. Finalmente, o capítulo 5 apresenta as conclusões finais e possíveis trabalhos futuros.

² A intensidade energética ε relaciona a quantidade de energia necessária à construção e instalação de um sistema de geração (ou armazenamento), com a quantidade de energia produzida (ou armazenada) pelo mesmo sistema durante o seu tempo de vida útil.

2 Estado da arte

Esta secção aborda o estado da arte das diferentes tecnologias de AEE que parecem ser mais promissoras atualmente. O capítulo apresenta-se dividido em três subsecções. Primeiramente são apresentados os diferentes tipos de AEE relevantes para a dissertação. Seguidamente são estudadas as tecnologias de armazenamento que parecem mais promissoras atualmente dentro de cada tipo. A última subsecção apresenta as conclusões preliminares onde são indicadas as informações mais relevantes a tirar da totalidade do capítulo.

2.1 Classificação de sistema de armazenamento

Uma das formas mais utilizadas para a divisão das tecnologias de AEE é a determinação de acordo com a forma de armazenamento utilizada. Na Tabela 2-1, os sistemas são classificados em sistemas de armazenamento mecânicos, elétricos, químicos, eletroquímicos e térmicos. Esta divisão é amplamente utilizada porque constitui uma característica única e universal do sistema de armazenamento; uma tecnologia de armazenamento pode, muitas vezes, ser empregue em diferentes campos de aplicação dentro dos quais possui características muito diferentes, mas o tipo de armazenamento continua a ser o mesmo.

Tabela 2-1: Classificação dos diferentes tipos de armazenamento de energia.

Armazenamento	Tecnologia
Mecânico	Bombagem
	Ar comprimido
	Volante de inércia
Elétrico	Supercondensadores
	Supercondutores magnéticos
Químico	Células de combustível
Eletroquímico	Baterias secundárias
	Baterias de fluxo
Térmico	Calor latente
	Calor sensível

Fonte: [2, 3]

2.2 Sistemas mecânicos

Os sistemas de armazenamento de energia mecânica armazenam energia sob a forma de energia cinética ou potencial. Existem três tecnologias que se consideram estabelecidas neste tipo de armazenamento: a bombagem (PHS) o ar comprimido (CAES) e o volante de inércia (*flywheel*). A energia é utilizada para bombear água para o reservatório superior no caso da bombagem, comprimir ar no caso do CAES e, no caso do volante de inércia, colocá-lo a girar. Quando necessário, estes sistemas de armazenamento entram em funcionamento e libertam a energia armazenada colocando turbinas em funcionamento que produzem eletricidade.

2.2.1 Bombagem

Os sistemas de bombagem são dos sistemas de acumulação de energia mais explorados atualmente. Têm um princípio de utilização bem conhecido: durante períodos de vazio as estações de bombagem usam a energia elétrica da rede para bombear a água de um reservatório com cota inferior para um com cota superior. Nas horas de ponta e nas horas de cheia, a água do reservatório superior é turbinada produzindo eletricidade que será posteriormente transferida para a rede elétrica.

Este sistema de armazenamento é conhecido fundamentalmente pela sua elevada eficiência, baixo tempo de resposta e a elevada capacidade de acumulação de energia. A sua eficiência poderá variar entre os 70% e os 85% [4]. A rápida resposta deste sistema permite a sua utilização em alturas de emergência, podendo demorar menos de dez minutos a atingir a produção nominal [3]. Além disto, a capacidade de armazenamento das hidroelétricas é bastante elevada podendo atingir um máximo de 10^4 MWh [4], o que explica o sucesso desta tecnologia. A taxa de auto-descarga é baixa e deve-se, essencialmente, às perdas de água por evaporação no verão. Tal fator é reduzido pela chuva que o repõe no inverno. No entanto, é necessário entender que, ao contrário dos restantes sistemas de armazenamento, as hidroelétricas têm como principal objetivo a produção de energia e, durante o verão e nos dias de mais calor, a quantidade de água nos reservatórios é muito baixa para ser bombeada, sendo assim o seu potencial de armazenamento muito reduzido ou mesmo inexistente. Este sistema possui ainda um tempo de descarga elevado, podendo demorar cerca de 10 h a descarregar totalmente, tornando-o uma solução viável para fornecer à rede elétrica elevadas quantidades de energia durante longos períodos de tempo. As hidroelétricas com bombagem têm um número de ciclos elevado, podendo chegar aos 20 000 ciclos e estando ativas durante décadas [4].

Apesar das suas vantagens este sistema possui determinadas desvantagens que o penalizam. Em termos de segurança, os problemas prendem-se com o facto de possíveis acidentes de infiltração ou até o possível rompimento e colapso da infraestrutura que poderão ser catastróficos para os trabalhadores e as populações vizinhas. Exemplos de tais desastres são o da barragem de Johnstown em 1889 [5], da barragem de St. Francis na Califórnia em 1928 [6]. Mais recentemente, a barragem de Delhi (Iowa) que, em 2010, devido a fortes chuvas causou uma grande cheia e levou à evacuação de 8000 pessoas [7].

Ainda que os acidentes em hidroelétricas possam ser bastante graves, esta não é a única característica negativa deste sistema. A grande dependência das condições meteorológicas e geográficas é algo que limita a utilização de hidroelétricas com bombagem. Porém, como já foi mencionado anteriormente, quando existe precipitação em grandes quantidades ou as temperaturas são muito elevadas por vários dias consecutivos, isto afeta o nível de água dos reservatórios, alterando assim a quantidade de energia armazenada, bem como a auto-descarga do sistema, havendo mais energia armazenada no inverno que no verão, sendo posteriormente a sua auto-descarga mais elevada no verão que no inverno. Além disto, nem todos os locais têm potencial hidroelétrico, sendo que este potencial só está disponível quando há água. Em períodos sem chuva e em que a água na albufeira é insuficiente para ser bombeada, o potencial de armazenamento é praticamente inexistente.

É ainda importante mencionar o tempo de planeamento e construção de uma central hidroelétrica que é de vários anos, e a possível necessidade de realojar habitantes e os impactos ambientais significativos que a construção de uma hidroelétrica implica [8].

Em termos de impactos ambientais é intuitivo fazer a distinção entre impactos da construção, utilização e o abandono das hidroelétricas. O primeiro diz respeito exclusivamente ao impacto que tem a construção de hidroelétricas no ambiente e na fauna e flora que nele habitam. Durante a fase de

construção, fase de enchimento e exploração, ações como a desmatagem, movimentação de terras, abertura de acessos, construção de edificações, movimentação de equipamentos e pessoas causam diversos impactos ambientais tais como a erosão, sedimentação, alteração da qualidade da água, redução de biodiversidade aquática, entre outros [9]. Durante a fase de utilização existem graves impactos ambientais que persistem tais como alteração permanente da biodiversidade do local, que pode ser também um problema ambiental pela perda de espécies de peixes, quer pela inexistência ou fraca construção de escadas de peixes, quer pela alteração da concentração dos minerais na água local [10]. Além destes impactos, as hidroelétricas com bombagem contribuem para o aquecimento global, mais do que se pensava inicialmente. Em 2000, investigadores da Universidade de Washington declararam que, a nível mundial, as albufeiras emitem cerca de uma gigatonelada de carbono para a atmosfera na forma de metano. Este valor é bastante significativo sendo que, em termos de efeito de estufa, o metano é 21 vezes mais nocivo que o dióxido de carbono [11]. Ao contrário de lagos naturais, as albufeiras são reservatórios artificiais que inundam grandes quantidades de matéria orgânica que produzem dióxido de carbono, metano e gases nitrosos ao longo da sua decomposição. Além disto, estes reservatórios tendem a receber muita matéria orgânica e diversos nutrientes (azoto, fósforo, etc.) por parte do rio a montante que estimula a produção dos gases efeito de estufa. Mais recentemente, em 2010, foi publicado um artigo sobre as emissões de gases efeito de estufa do lago Wohlen, pertencente a uma hidroelétrica na Suíça, que revela que estas emissões são superiores ao esperado e que apenas este lago emite gases efeito de estufa na ordem das 150 000 toneladas por ano, tornando os impactos ambientais por parte deste sistema mais graves do que se pensava inicialmente [12].

Ainda que a construção e utilização de hidroelétricas tenha diversos impactos ambientais, as suas vantagens justificam os contínuos investimentos na evolução e construção das mesmas. De facto, os responsáveis pelos futuros projetos de hidroelétricas com bombagem continuam a justificar a necessidade da sua construção devido à crescente procura de energia e com o objetivo de promover o uso de energias renováveis em diversos países³. Atualmente começam a ser propostos mais projetos com a introdução de máquinas de velocidade variável. Esta tecnologia, já utilizada em diversas instalações no Japão, permite a regulação da quantidade de energia absorvida no modo de bombagem [13]. Esta modificação permite que as turbinas operem mais perto da sua eficiência ideal. Dentro da União Europeia, Portugal lidera atualmente a quantidade de projetos para a melhoria e construção de novas instalações. Em 2012 foi feita uma expansão da barragem do Alqueva por parte da EDP – Alqueva II. O aproveitamento de Alqueva dispunha de duas albufeiras a montante e jusante. No entanto, a albufeira de jusante possuía uma capacidade excedentária. Assim, instalou-se uma nova central sem ser necessária a construção de barragem. Embora a nova central não produza mais energia relativamente à previamente existente, ela pode operar com a sua componente reversível e equilibrar a produção eólica nacional. Esta central conta com cerca de 240 MW reversíveis [14].

³ O aumento da potência eólica instalada deverá ser complementado com um aumento da capacidade hidroelétrica (especialmente reversível), a qual deverá compensar a acentuada irregularidade de produção de energia eólica, possibilitando a bombagem do excesso de energia disponível durante o período noturno de dias com elevada produção eólica [14], demonstrado na Figura 2-1.

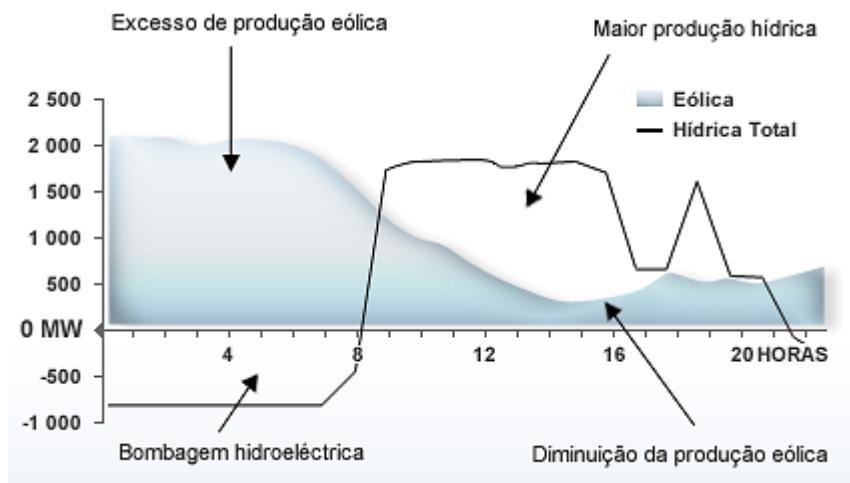


Figura 2-1: Complementaridade hídrica-eólica [15].

2.2.2 Sistemas de ar comprimido

A tecnologia de armazenamento de energia através de ar comprimido, mais conhecida pela sigla CAES, é atualmente muito explorada e com várias centrais projetadas.

O ar comprimido nada mais é que ar atmosférico que foi comprimido para uma pressão superior à atmosférica. Estes sistemas têm uma física relativamente semelhante à das centrais hidroelétricas com bombagem. Durante as horas de vazio, o ar é comprimido através de um compressor, utilizando energia da rede elétrica ou proveniente da produção de queima de gás [16]. Este ar é então utilizado durante as horas de cheia e de ponta para a produção de energia a um custo mais baixo a das centrais convencionais [17]. Apesar das semelhanças com a central hidroelétrica, os sistemas de ar comprimido possuem uma grande diferença: o ar necessita de ser comprimido antes da sua utilização para gerar energia. Consequentemente, esta compressão gera grandes quantidades de calor. Assim, mediante o que se faz com este calor existem, essencialmente, dois modos de efetuar o armazenamento de energia: diabático e adiabático.

O armazenamento diabático (Figura 2-2) requer a queima de combustível. A energia elétrica proveniente da rede é utilizada por compressores para comprimir o ar que é então arrefecido e injetado num reservatório. No processo de expansão, em que se retira o ar do reservatório, é necessário aquecê-lo através da combustão para que seja depois expandido numa turbina para produzir eletricidade. No sistema diabático, para que esta expansão seja possível, é necessário o uso de combustível para aquecer o ar e aumentar assim a produção elétrica e prevenir que as baixas temperaturas criadas pela expansão possam causar danos na turbina. O processo de combustão permite que a energia produzida seja entre 30 e 35% superior à consumida durante a compressão [18]. Normalmente é utilizado gás natural como combustível, sendo também possível utilizar outras fontes de calor. Alguns autores [19] defendem que a ER poderá tornar-se uma opção viável (e.g. energia eólica) para efetuar a compressão do ar. A eficiência deste sistema é relativamente baixa devido às diversas perdas existentes. As mais significativas perdas provêm da libertação do calor proveniente desperdiçado da compressão para a atmosfera. Existem, ainda que reduzidas, inevitáveis perdas de calor por dissipação através das paredes do reservatório. Contudo, ainda que este sistema tenha perdas muito significativas, é o único tipo de sistema atualmente utilizado em grande escala. De facto, os dois sistemas de armazenamento de ar comprimido de grande escala em que onde o ar é comprimido em grandes cavernas subterrâneas,

são deste tipo. A central CAES instalada em Huntorf segue um ciclo convencional de uma turbina a gás. Na central de McIntosh foi adicionada a recuperação do calor rejeitado para pré-aquecer o ar comprimido, permitindo uma redução de 25% no consumo de combustível.

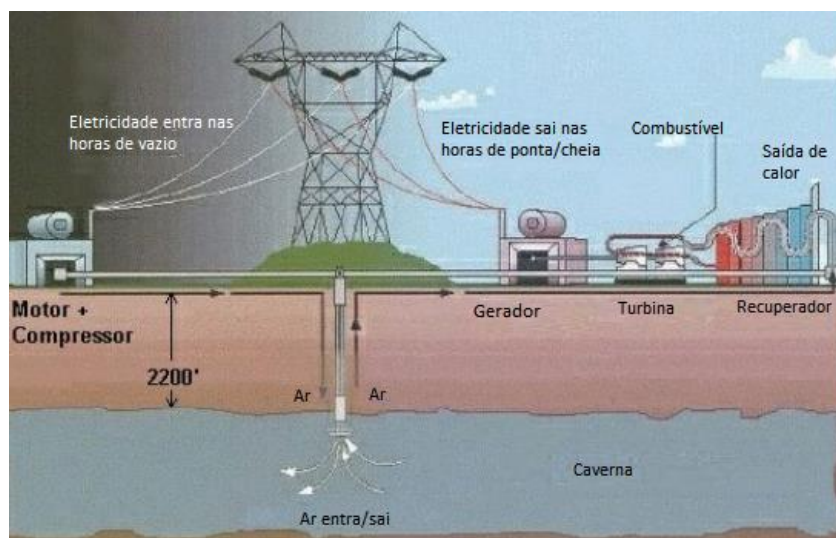


Figura 2-2: Representação de uma central convencional de ar comprimido (diabático), adaptado de [3].

Recentemente foi desenvolvida uma nova técnica de armazenamento mais eficaz – o armazenamento adiabático. Esta técnica surgiu devido à necessidade de diminuir as emissões de gases efeito de estufa e ao aumento dos preços dos combustíveis fósseis. Este tipo de sistema não requer a queima de combustível, sendo o ar comprimido por um conjunto de compressores. O calor produzido ao longo da compressão é armazenado num reservatório próprio e utilizado na fase de descarga para aquecer o ar proveniente do reservatório antes da expansão na turbina.

O armazenamento adiabático (AACAES) é ainda muito recente mas tem sido alvo de estudos constantes podendo, em teoria, possuir uma eficiência de aproximadamente 70%, dependendo do material utilizado para o isolamento do reservatório, de modo a evitar a dissipação de calor. Este tipo de armazenamento retém o calor produzido pela compressão e devolve-o ao ar aquando da sua expansão de forma a gerar energia. O início da construção da primeira instalação adiabática na Alemanha estava previsto para 2013, e é considerado o maior projeto CAES até à data. O projeto ADELE⁴ promete ter uma capacidade de armazenamento de 360 MWh e uma potência de 90 MW. O início de construção foi adiado para 2016 por motivos não revelados.

O tipo de local utilizado para armazenamento de ar comprimido pode variar e o reservatório pode ser subterrâneo ou de superfície. No caso de ser subterrâneo, o ar é normalmente armazenado em cavernas de sal artificiais pois estas possuem diversas características tais como a baixa perda de pressão e o facto do oxigénio do ar não reagir com o material salino, o que torna o seu armazenamento mais eficiente [20]. No entanto, as cavernas de sal não são o único local onde tal armazenamento é possível, sendo ainda utilizados aquíferos naturais. Ainda assim, este método é pouco estudado, não sendo ainda possível saber se o oxigénio do ar poderia ou não reagir com o material rochoso do

⁴ ADELE é o acrónimo utilizado pela companhia alemã RWE e significa, em português, “armazenamento de ar comprimido adiabático para fornecimento de eletricidade”.

aquífero ou até com os determinados microrganismos⁵. Outra estratégia que tem sido explorada ainda mais recentemente é o armazenamento do ar em lagos ou oceanos, uma vez que ambos podem fornecer as pressões necessárias sem necessidade de perfuração de cavernas ou aquíferos. A companhia Hydrostor do Canadá está a desenvolver um sistema comercial de armazenamento subaquático para armazenar energia em ar comprimido de 4 MW [21]. Já no caso de armazenamento à superfície, este pode ser feito em tanques de metal. Esta solução, pouco explorada para esta tecnologia, é ainda pouco viável a nível económico. Projetos que envolvam armazenamento de ar comprimido à superfície estão ainda em estados iniciais de demonstração para estudar os melhores materiais para fazer este armazenamento. Sendo esta uma das desvantagens mais importantes deste sistema, uma vez que devido à expansão do ar durante os ciclos que, com o seu arrefecimento geram pequenos depósitos de água dentro do tanque, aumentando o potencial de corrosão. Este tipo de sistemas são mais fáceis de instalar do que uma central hidroelétrica por não serem dependentes da geografia do local possuem, no entanto, um custo de investimento muito mais elevado [22].

Durante esta dissertação, a distinção entre sistemas de ar comprimido será feita através do tipo de reservatório - uma vez que este influencia significativamente as suas características de armazenamento. Assim, será dividido em ar comprimido de armazenamento subterrâneo (CAES subterrâneo) e ar comprimido de armazenamento à superfície (CAES superfície), sendo feita a distinção adicional entre adiabático e diabático quando tal se demonstre conveniente. No entanto, considera-se como adequados os sistemas adiabáticos, pois permitem um maior aproveitamento de energia armazenada devido à sua eficiência superior.

No que toca aos impactos ambientais, um dos fatores limitantes da utilização de ambos os tipos de sistema é a utilização de gás natural. A utilização de combustíveis fósseis neste sistema é cerca de 1/3 da utilizada numa central convencional, produzindo assim 2/3 a menos de poluentes para obter a mesma quantidade de energia. O estudo [19] sugere a substituição destas centrais convencionais através da combinação de CAES com sistemas eólicos e de gaseificação⁶ da biomassa. Os autores do mesmo estudo afirmam que esta substituição poderia eliminar as emissões de CO₂ por completo. Em termos de segurança, os riscos mais relevantes desta tecnologia são os possíveis acidentes com ruturas nos tanques, ainda que existam medidas de prevenção (válvulas de segurança para o alívio de pressão) para reduzir a probabilidade de acidente [23]. É ainda de destacar que este sistema carece de uma manutenção elevada, consequentemente aumentando os seus custos de utilização.

No geral, os sistemas CAES possuem duas vantagens essenciais quando comparados à bombagem. Em primeiro lugar o armazenamento de ar comprimido não é tão dependente das condições climáticas como a bombagem; em segundo lugar o conceito de CAES pode ser adaptado a pequenas dimensões e utilizado no setor do transporte, tornando este sistema de armazenamento mais flexível em termos de aplicação. Contudo, quando comparados com veículos elétricos, os veículos baseados neste sistema não oferecem vantagens. Uma possível solução seria usar um sistema híbrido com um sistema de armazenamento (tanque) que seria recarregado através de um motor de combustão interna. A competitividade deste sistema no mercado dos transportes está ainda em discussão.

⁵ A importância de estudar a potencial reação do oxigénio com o material rochoso ou microrganismos existentes no local tem a ver com a possibilidade de esta reação pode levar à redução de oxigénio ou até à diminuição da porosidade do reservatório. Consequentemente, esta diminuição leva a uma perda de capacidade de armazenamento uma vez que em aquíferos o armazenamento de ar é feito nos poros do material rochoso [98].

⁶ Gasificação é o processo que converte os compostos ricos em carbono (carvão, petróleo, biocombustíveis, etc.) em monóxido de carbono e hidrogénio pela reação da matéria-prima com o oxigénio.

Atualmente, para que haja a devida utilização da energia proveniente do ar comprimido é necessário que o reservatório seja de larga escala, i.e. que as centrais se situem em locais com adequadas formações subterrâneas, tais como por exemplo caves subterrâneas a grandes profundidades, rodeadas de rochedos (e.g. minas), cavernas de sal ou até mesmo poços de gás já esgotados para que se reduza o custo devido à construção de cavernas artificiais.

2.2.3 Volante de inércia

Esta tecnologia, conhecida por *flywheel* na literatura anglo-saxónica, é composta por um volante de inércia acoplado a um motor/gerador. O volante de inércia é colocado dentro de um sistema de vácuo (para que seja possível eliminar perdas por fricção do ar) e suspenso por rolamentos magnéticos⁷ [24]. Estes rolamentos permanentes não têm qualquer contacto com as partes giratórias, não precisando assim de qualquer tipo de lubrificação, suportando o peso do volante de inércia através forças de repulsão eletromagnéticas [24] mantendo, consequentemente a sua estabilidade durante o seu funcionamento. A Figura 2-3 apresenta o esboço de um sistema de armazenamento deste tipo.

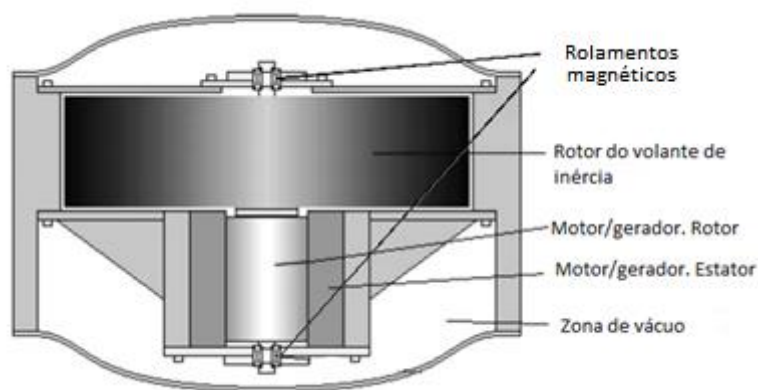


Figura 2-3: Esboço de um sistema de armazenamento de volante de inércia [24].

A energia é armazenada numa massa rotativa, sob a forma de energia cinética de rotação. A quantidade de energia cinética de rotação acumulada depende não só da massa do corpo, mas também da sua velocidade de rotação. Neste sistema, a energia cinética presente pode ser transferida pelo volante de inércia para o sistema ou absorvida pelo volante de inércia recorrendo a uma máquina elétrica que funciona quer como motor, quer como gerador, dependendo apenas do ângulo da sua carga. Quando acionado como motor, a energia elétrica absorvida pelo estator é convertida em energia cinética de rotação e aplicada ao rotor, causando maior rotação e ganho de energia cinética (modo de armazenamento de energia). No modo de gerador, esta energia armazenada no rotor transformada em energia elétrica, sendo seguidamente injetada na rede elétrica [24].

⁷ Os rolamentos são constituídos por ímanes e eletroímãs. A função dos ímanes é de suportar o peso do volante de inércia através de forças de repulsão. Já os eletroímãs têm a função de estabilizar o volante de inércia, embora isto já necessite de um sistema de guia complexo. Uma maneira mais fácil de estabilizar o volante é através do uso de rolamentos mecânicos nas pontas do eixo do volante de inércia. Isto é possível apenas porque o volante está suspenso pelos ímanes e portanto reduz o atrito [99, 24].

Esta tecnologia começou a ser mais estudada a partir de 1970 – ano em que começaram a surgir os primeiros sistemas de armazenamento de suporte para a rede e também para veículos elétricos. Ao mesmo tempo foram desenvolvidos rotores mais apropriados e, posteriormente, a partir de 1980, começaram a surgir os primeiros rolamentos magnéticos. Ultimamente têm existido avanços significativos nos materiais que constituem o volante de inércia, bem como nos rolamentos magnéticos, o que tem tornado esta tecnologia mais competitiva [24].

Os volantes de inércia possuem características que os tornam úteis em determinadas aplicações onde atualmente são utilizados outros sistemas de armazenamento [24]. Quando comparado com outros sistemas de armazenamento, o volante de inércia tem um elevado tempo de vida, durando várias décadas com pouca (ou nenhuma) manutenção necessária [24] e um número de ciclos superior a 20,000 [25]. No entanto este sistema possui alguns problemas de autonomia, devido nomeadamente à sua rapidez de descarga (na escala dos minutos), ainda que a sua capacidade de armazenamento possa variar entre alguns kWh e aproximadamente 5 MWh [4]. O tempo de recarregamento é também baixo. A profundidade de descarga⁸ é uma grande vantagem deste sistema: tem a capacidade de funcionar bem quer na superfície, quer na profundidade da descarga ao contrário, por exemplo, das baterias tradicionais.

Outras das vantagens que diferenciam o volante de inércia de outros sistemas é a facilidade com que se pode medir o estado da carga, desde que se conheça a velocidade de rotação.

A utilização desta tecnologia é especialmente importante para aplicações de larga escala, especialmente para servir de apoio à rede elétrica. Esta tecnologia tem ainda a vantagem da sua escalabilidade, sendo fácil de adaptar a capacidade de armazenamento às necessidades da aplicação. Uma vez que frequentemente as fontes de energia renováveis provocam deformações na onda de tensão, o baixo tempo de resposta desta tecnologia é talvez a sua característica mais importante para a rede elétrica. O seu baixo tempo de resposta faz com que a sua introdução na rede elétrica seja de grande importância para suavizar os picos de fornecimento de energia a certas alturas do dia, melhorando a qualidade da energia através da regulação da frequência, facto também ilustrado na Figura 2-4.

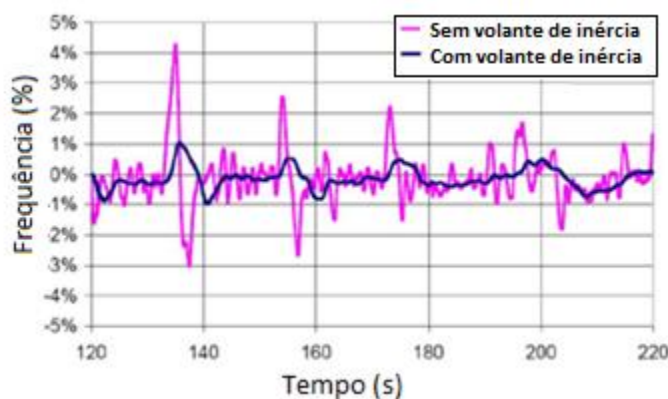


Figura 2-4: Gráfico da variação da frequência da rede isolada observando o efeito do volante de inércia [19].

A eficiência dos volantes de inércia é bastante elevada, podendo chegar aos 90% [25] e, apesar da sua limitada capacidade de armazenamento, a configuração deste sistema permite que seja possível ligar diversos sistemas para armazenar quantidades de energia maiores sem que tal afete a eficiência

⁸ A profundidade de descarga refere-se à quantidade de carga que pode ser retirada ao sistema de armazenamento num ciclo típico sem que isso afete o sistema.

do sistema. Os impactos ambientais (diretos) deste sistema são baixos [4]: não existem emissões diretas, nem a alteração de fauna e flora ou libertação de poluentes na utilização do sistema, ao contrário dos sistemas mencionados anteriormente [26].

No que toca a problemas de segurança, o volante de inércia considera-se ainda em fase de estudo; o material mais utilizado para a construção dos volantes de inércia é a fibra de carbono que, ao contrário dos materiais mais densos (e.g. metais), não causa problemas tão graves caso ocorra uma falha no sistema. Além disto, estes materiais são testados para que se conheça a sua velocidade de rotação máxima para que se garanta que esta não é excedida [27]. Existem também medidas de contenção para evitar estes problemas, essencialmente existem três formas de resolver este problema: 1) utilização de materiais com robustez suficiente; 2) utilização de um volante de inércia exterior que engloba o volante de inércia principal e que irá absorver a energia excessiva; 3) utilização de um material que absorva a energia excessiva. É ainda de notar que o risco de acidente aumenta consoante o tamanho do sistema [28, 29] .

2.3 Sistemas elétricos

Os sistemas de armazenamento elétricos estão divididos em supercondensadores e supercondutores magnéticos. Este tipo de sistema difere do anterior por utilizar energia elétrica para realizar o movimento de cargas elétricas. No caso dos supercondensadores e condensadores, a energia é armazenada num campo eletrostático e, no caso de supercondutores magnéticos, a energia é armazenada num campo magnético gerado pelo fluxo de corrente DC numa bobina supercondutora.

2.3.1 Condensadores e supercondensadores

Os supercondensadores (SC) têm ambas as funções de condensador e de bateria eletroquímica, com a diferença de não terem reações químicas, permitindo assim aumentar fortemente o número de ciclos de carga/descarga. O armazenamento de energia nestes sistemas depende do valor da diferença de potencial existente entre os dois elétrodos.

Os condensadores são formados por duas placas condutoras com cargas opostas e um material isolante chamado de dielétrico. A capacidade (aptidão de acumulação de cargas elétricas ao aplicar uma tensão aos terminais) é determinada pelas características do material dielétrico, pela dimensão das distância que as placas possuem entre si, ou seja, é diretamente proporcional à área e inversamente proporcional à espessura do dielétrico. Assim, a capacidade de armazenamento de um condensador depende da tensão aplicada e da capacidade entre as placas.

O funcionamento dos SC é semelhante ao dos condensadores comuns, com a diferença de que o material isolante é substituído por eletrólito condutor iónico (Figura 2-5) [3]

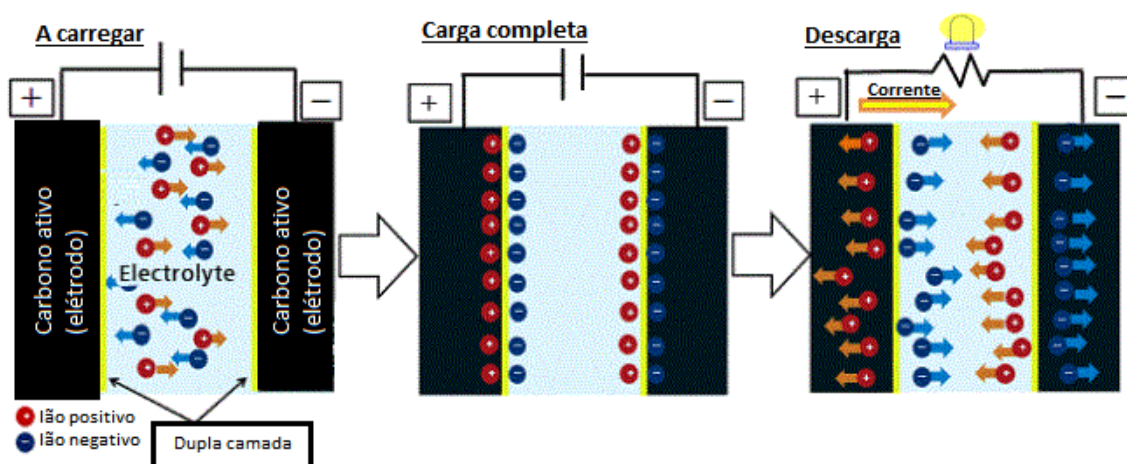


Figura 2-5: Ilustração do interior de um SC, durante a sua carga, quando está completamente carregado e durante a sua descarga, adaptado de [30].

No que toca a materiais de construção, os SCs usam como principal material o carbono, quer para a constituição do ânodo, quer do cátodo, sendo o eletrólito de natureza orgânica ou aquosa [31]. No caso de o eletrólito ser de natureza aquosa, o supercondensador terá uma menor densidade energética⁹ do que um supercondensador com eletrólito de natureza orgânica. Isto acontece devido à tensão de dissociação do eletrólito aquoso (1.15V por eletrodo) ser relativamente baixa quando comparada com a tensão de dissociação de eletrólito orgânico (1.35V por eletrodo). A nível de temperatura, o eletrólito aquoso tem uma gama de temperatura de operação mais baixa que o eletrólito orgânico. Desta forma, o eletrólito aquoso é utilizado em SC com baixa densidade energética mas elevada densidade de potência [16]. Estes SCs têm também um preço mais acessível. Já os condensadores de eletrólito orgânico possuem uma densidade de potência mais baixa mas uma densidade energética superior [16].

Devido ao seu curto tempo de resposta, esta tecnologia tem sido aplicada em dispositivos de controlo. É também aplicada em turbinas eólicas individualmente, efetuando o controlo de velocidade do rotor através do controlo do ângulo das pás consoante a intensidade do vento do local de forma a manter uma velocidade constante. Assim, os SCs procedem ao controlo da taxa de aumento e decréscimo da potência produzida consoante o aumento ou diminuição da velocidade do vento [16]. Dentro das desvantagens que mais penalizam este sistema está a sua auto-descarga que é de, aproximadamente, 5% por dia e a variação da tensão com o nível de carga [3].

Ainda que a sua eficiência seja elevada (aproximadamente 95%), os supercondensadores têm de trabalhar a tensões bastante baixas, tipicamente até aos 2.7V, o que significa que as células têm de se encontrar ligadas em série. Isto pode-se tornar um problema porque a tensão não se vai encontrar distribuída de forma simétrica por todos os supercondensadores. Caso não existam medidas para compensar a sobretensão, uma ou mais componentes do sistema poderão ficar com o seu ciclo de vida bastante reduzido e, no pior dos casos, pode vir a destruir estas componentes [32]. Estes sistemas possuem também problemas devido à sua baixa tensão, não podendo armazenar energia em quantidades comparáveis aos sistemas mencionados anteriormente, sendo a sua capacidade máxima de aproximadamente 10 kWh [4]. Os problemas de segurança deste sistema devem-se sobretudo à destruição de componentes, ainda que estas não provoquem explosões ou perigos quer para os

⁹ A densidade energética depende da tensão aumentando com o quadrado desta. Assim, eletrólitos que possuam uma maior tensão de dissociação têm também uma maior densidade energética.

utilizadores quer para os trabalhadores. A manutenção do sistema é vital para que este seja seguro, sendo dependente da quantidade de supercondensadores utilizados no sistema. Assim, as necessidades de manutenção aumentam com o aumento da capacidade do sistema, pelo que se considera que para um bom funcionamento este sistema requer condições obrigatórias de manutenção a nível do controlo da tensão.

Os impactos ambientais deste sistema são nulos durante a sua utilização, no entanto, os materiais constituintes destas unidades constituem um elevado risco ambiental no seu despejo quando este não é feito de forma apropriada. Geralmente, os supercondensadores são constituídos por enxofre, flúor, e grupos de cianetos que são bastante prejudiciais para o meio ambiente quando descartados através de métodos convencionais de aterro ou incineração. Ainda que a evolução tecnológica e o desenvolvimento de novos materiais possam vir a resolver este problema [33], de momento o seu desenvolvimento é dependente destes materiais, pelo que estes eventuais avanços não serão considerados nesta dissertação.

Tal como o volante de inércia, a utilização dos supercondensadores não dependem da geografia ou condições climáticas locais, podendo ser construídos e utilizados em qualquer local ainda que o seu ramo de aplicações seja bastante limitado.

2.3.2 Supercondutores magnéticos

O armazenamento de energia através de supercondutores magnéticos (SMES) é alcançado por um dispositivo de corrente contínua (DC), que armazena energia num campo magnético e que pode libertar essa energia instantaneamente.

Uma unidade de armazenamento de energia deste tipo é composta por uma grande bobina supercondutora a temperaturas extremamente baixas de -270°C , sendo mantida através de um criostato que contenha hélio ou azoto líquido. A tensão e a corrente máxima determinam o máximo de energia/potência que pode ser extraída/injetada por este sistema de armazenamento de energia. A corrente aumenta enquanto o sistema carrega e diminui na descarga, sendo necessário um sistema de conversão para corrente alternada (AC) [3].

A sua principal característica é a elevada densidade de potência (com moderada densidade de energia) e um infinito número de ciclos de carga/descarga, ainda tendo uma elevada eficiência de conversão (superior a 95%) [34]. Estes sistemas são ainda capazes de uma descarga profunda muito próxima da totalidade de energia armazenada. Possuem uma resposta muito rápida (inferior a 100 milissegundos), tornando-se a solução ideal, deste ponto de vista, para regular a frequência da rede elétrica [3].

No entanto, para que a corrente contínua flua e gere um campo magnético, são necessários cabos específicos, constituídos por chumbo, titânio-nióbio (NbTi), mercúrio ou vanádio, capazes de diminuir a resistência assim como a energia dissipada por calor [3, 34]. Tem ainda como desvantagem a necessidade de refrigeração que pode limitar a sua operação, assim como aumentar os custos de investimento, tornando-se assim pouco práticos e pouco desenvolvidos para se poder considerar uma solução de armazenamento de energia ao nível das restantes mencionadas.

2.4 Sistemas químicos

Os sistemas químicos são muito diferentes dos restantes sistemas. Nestes sistemas a energia é utilizada para a produção de componentes químicos que são armazenados e posteriormente utilizados para a produção de energia. Um exemplo de aplicação que é considerado promissora é a utilização de energia para a produção de hidrogénio e posteriormente a utilização do hidrogénio em células de combustível. Aqui a energia é utilizada para a produção de hidrogénio (normalmente através da decomposição de gás natural). Este hidrogénio é armazenado para que depois possa ser utilizado como combustível para a célula de combustível.

2.4.1 Células de combustível e produção de hidrogénio

Foi com a crise petrolífera, na década de 70, que se passou a considerar o hidrogénio como uma possível fonte de energia.

As células de combustível são dispositivos que transformam energia química em energia elétrica recorrendo a reações eletroquímicas. A primeira demonstração de uma célula de combustível foi feita por William Grove em 1839. No entanto, só a partir de 1990 é que, finalmente, as células de combustível começaram a demonstrar a suas potencialidades com o desenvolvimento de mais de 120 veículos (incluindo autocarros), por parte de empresas produtoras de automóveis.

A tecnologia de células de combustível pode ser dividida em duas categorias, dependendo da origem do combustível:

- Sistemas diretos, em que os combustíveis tais como hidrogénio, metanol, hidrazina, podem reagir diretamente com a célula.
- Sistemas indiretos, em que os combustíveis tais como gás natural ou combustíveis fósseis têm de ser primeiramente convertidos em gases ricos em hidrogénio (“*reforming*”) que depois são utilizados como combustíveis na célula.

De forma a ser possível tirar o maior proveito desta tecnologia, é aconselhável a existência de um tanque de combustível (de preferência hidrogénio para alcançar uma maior eficiência) de reserva para assegurar a disponibilidade de recursos em períodos de maior consumo.

O princípio geral do processo é relativamente simples. Primeiro, há a dissociação do hidrogénio molecular presente no combustível para formar iões e eletrões. Seguidamente, os iões migram através do eletrólito para a superfície catalítica do cátodo. Em simultâneo, os eletrões por deslocam-se através de um circuito externo gerando assim corrente elétrica e ligando-se novamente aos iões de hidrogénio no cátodo, para formar moléculas de hidrogénio. Em seguida, este hidrogénio é misturado com oxigénio para obter moléculas de água como produto estável. Este processo está ilustrado na Figura 2-6 [3].

Assim, dependendo quer do tipo de combustível utilizado, do oxidante, da temperatura de operação, do tipo de eletrólito e da sua aplicação, as células de combustível podem ser de diferentes tipos, tais como: célula de combustível alcalina (AFC), célula de combustível com membrana de permuta iónica (PEMFC), célula de combustível ácido fosfórico (PAFC), célula de combustível de óxido sólido (SOFC), célula de combustível de carbonato fundido (MCFC), célula de combustível de metanol direto (DMFC), entre outras [3]. Em todas estas células é necessária a utilização de hidrogénio e oxigénio para a produção de água, sendo as principais diferenças o tipo de eletrólito utilizado e o combustível. A título de exemplo, nas células MCFC é utilizado como eletrólito o ião carbonato CO_3^{2-} , existindo a entrada de oxigénio hidrogénio e ainda de dióxido de carbono CO_2 . O

resultado é a emissão de dióxido de carbono, calor e água, sendo o dióxido de carbono reutilizado num novo ciclo.

Em termos de aplicações, nem todas estas células são portáteis e algumas são apenas utilizadas em aplicações estacionárias: as células PEMFC, AFC e DMFC são as mais utilizadas em aplicações móveis. As células MCFC e SOFC são obrigatoriamente estacionárias. As células PAFC podem ser utilizadas em ambos os campos de aplicação.

Além do seu uso em sistemas de produção distribuída de eletricidade (particularmente em locais que exigem baixa potência - e.g. zonas residenciais ou sistemas de emergência, etc.), as células de combustível podem ser utilizadas na produção centralizada de eletricidade e na cogeração de média potência [3].

Um dos maiores problemas deste sistema é precisamente o seu combustível. As células de combustível utilizam, em geral, o hidrogénio como combustível. O hidrogénio livre não existe na natureza e tem de ser produzido. Assim sendo, não é uma fonte de energia mas um vetor de energia – a sua produção conduz a um combustível que pode ser utilizado para gerar energia. Para o obter é necessário quebrar ligações entre moléculas que o contenham e, para que tal aconteça, é necessário fornecer energia suficiente ao sistema. Atualmente, a forma mais económica para a produção de hidrogénio é através da decomposição de gás natural. O gás natural é tratado com vapor a fim de retirar os átomos de hidrogénio às moléculas de metano. Em termos globais, há uma perda de energia significativa (aproximadamente de 60%) neste processo. E, estando dependente da disponibilidade do gás natural, o preço do hidrogénio produzido por este método será sempre dependente do preço do gás natural.

Apesar de ser possível a produção de hidrogénio através da decomposição de moléculas de água, este processo exige um ainda mais alto investimento que poderá nunca ser competitivo com as restantes soluções.

No fundo, é necessário ter em conta que, devido a ainda ser uma tecnologia recente, a sua eficiência global é relativamente baixa e o seu custo total é bastante elevado [35]. Adicionalmente, esta tecnologia possui uma baixa densidade de energia por unidade de volume. Todas estas características constituem grandes desvantagens e limitam o investimento nesta tecnologia, assim como o seu desenvolvimento, começando a ser ultrapassadas por algumas baterias eletroquímicas.

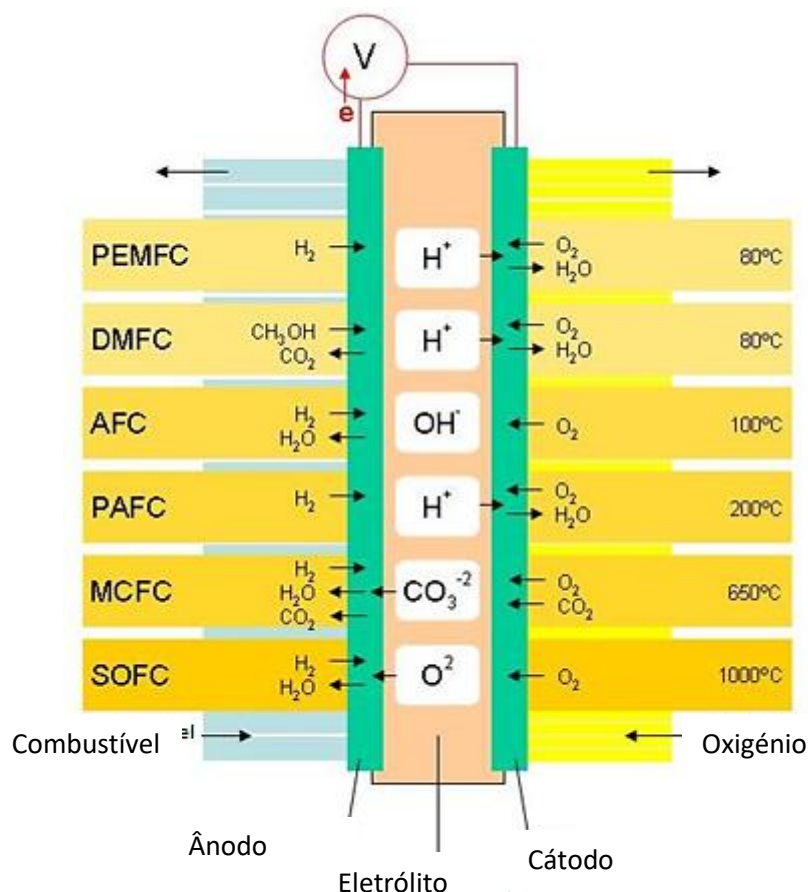


Figura 2-6: Ilustração esquemática das células de combustível discutidas tendo em conta as diferenças e semelhanças entre elas, adaptado de [36].

2.5 Sistemas eletroquímicos

Os sistemas eletroquímicos são constituídos por um conjunto de células eletroquímicas ligadas em série ou paralelo que produzem eletricidade com uma determinada tensão através de uma reação eletroquímica. A descarga destes sistemas permite a libertação da energia ao passo que a carga permite o armazenamento.

2.5.1 Baterias secundárias

Tradicionalmente designada de bateria, este tipo de armazenamento tem a capacidade de transformar energia química em energia elétrica (e vice-versa) através de reações químicas, com poucas ou nenhuma emissões prejudiciais ao meio ambiente [3].

As baterias, em geral consideradas como o símbolo do armazenamento de energia, são tão variadas como a capacidade de acumulação possível. Entre a vasta gama de tipos de tecnologia de baterias usadas em sistemas de armazenamento, é possível enunciar algumas dependendo do tipo de armazenamento escolhido (estacionário ou móvel).

As diferentes características que estes sistemas de AEE possuem tornam este conjunto de sistemas bastante versátil. De facto, as baterias provaram ser capazes de armazenar grandes ou pequenas quantidades de energia por períodos de tempo curtos ou longos. Esta larga gama de aplicações justifica a necessidade contínua de investigação e desenvolvimento (I&D) de novas baterias, assim como o

melhoramento do desempenho das existentes, não só para os sistemas móveis mas também para sistemas estacionários, como circuitos de emergência ou armazenamento de ER em áreas isoladas.

Embora existam muitas configurações que proporcionam as diferentes características do sistema, o princípio de funcionamento é relativamente semelhante: cada célula é constituída por um eletrólito (líquido ou sólido) que proporciona o meio de transferência de eletrões entre dois elétrodos efetuando cargas e descargas. Durante a descarga, o eléctrodo negativo (ânodo) cede eletrões para o circuito externo e é oxidado durante a reação e o eléctrodo positivo (cátodo) recebe os eletrões provenientes do circuito externo e é reduzido durante a reação química. Aplicando uma tensão aos terminais da bateria, é possível realizar a reação contrária que permite recarregar o sistema.

Dependendo do propósito da bateria e do campo de aplicação em que é suposto ser inserida, existem diferentes combinações de ânodo, cátodo e eletrólito que permitem obter uma temperatura de operação mais baixa, um número de ciclos mais elevado, um tempo de descarga mais longo etc. No geral, e quando comparado com os restantes sistemas de armazenamento discutidos até agora, as baterias permitem obter uma elevada densidade de potência para elevadas densidades de energia. Esta característica torna-as muito adequadas para aplicações móveis de diversos tipos. Outra das suas características importantes é o baixíssimo tempo de resposta que normalmente ronda os milissegundos.

No entanto, as baterias têm ainda um longo caminho a percorrer no que respeita ao seu tempo de vida e capacidade cíclica [37]. O processo químico que conduz ao ciclo de carga/descarga contribui para o desgaste do eletrólito danificando, consequentemente, os elétrodos e/ou provocando danos moleculares permanentes em alguns componentes [38]. Tipicamente, uma bateria possui 4000 ciclos de vida, ainda que este valor não seja fixo.

Em seguida são mencionadas as características mais importantes das baterias se consideram atualmente como as mais significativas. No Anexo A.2: Outras baterias eletroquímicas são mencionadas outras baterias que não serão consideradas pelo facto de não serem utilizadas atualmente ou simplesmente por possuírem características globalmente muito inferiores ou muito semelhantes às baterias aqui apresentadas.

1. Baterias chumbo-ácido

As baterias de chumbo-ácido correspondem ao tipo de armazenamento com maior maturidade dentro do mundo das baterias [39]. Esta bateria é constituída por um eléctrodo de chumbo e um de dióxido de chumbo, ambos mergulhados no eletrólito (ácido sulfúrico).

Dentro das diferentes configurações que as baterias de chumbo-ácido podem ter, as mais promissoras são: as baterias de chumbo-ácido reguladas por válvula, também conhecidas por VRLA (*Valve Regulated Lead Acid*) e as ultrabaterias, também conhecidas por ALAB (*Advanced Lead Acid Battery*) ou por *ultrabattery*.

As baterias do tipo VRLA resultaram da evolução tecnológica da bateria convencional de chumbo-ácido onde um dos maiores problemas era a segurança de utilização por risco de derrame de eletrólito. Assim, estas baterias mantêm o mesmo princípio químico das convencionais, com a diferença do eletrólito estar imobilizado. Além disto, ao contrário da bateria convencional chumbo-ácido, as baterias VRLA contêm uma válvula reguladora de pressão que inibe a entrada de ar nas células e a libertação do hidrogénio [40]. Esta evolução permite diminuir a necessidade de manutenção, assim como reduzir o peso e o tamanho da bateria. No entanto, são baterias mais caras e com um período de vida mais curto, quando comparadas às configurações anteriores.

A ultrabateria é uma nova configuração da bateria de chumbo-ácido e é conhecida como a bateria de chumbo-ácido avançada que combina as melhores características da bateria VLRA com as melhores características dos supercondensadores - alta capacidade de armazenamento com um tempo de vida mais longo e uma eficiência mais elevada.

Durante a operação normal de uma bateria de chumbo-ácido, são desenvolvidos cristais de sulfato de chumbo no eletrodo negativo que são posteriormente dissolvidos durante o processo de carga da bateria. Após diversos ciclos de carga e descarga, estes cristais tornam-se maiores e mais resistentes à dissolução tornando-se permanentes. Este processo, designado de sulfatação, é o que mais condiciona o sucesso desta bateria. A longo prazo, estes cristais aumentam a resistência interna da bateria e diminuem a sua potência, capacidade e eficiência.

Ao inserir um supercondensador na bateria VLRA, o processo de sulfatação é inibido e permite que a bateria opere com uma eficiência elevada mesmo em estados parciais de carga. Outro dos problemas é o processo de eletrólise que causa a corrosão do eletrodo positivo da bateria degradando e diminuindo o seu desempenho.

No entanto, a eletrólise é um processo que ocorre com menos frequência num estado de carga inferior. Uma vez que a ultrabateria permite a utilização da bateria neste estado de carga mais baixo sem se perda de capacidade ou eficiência, a corrosão pode ser significativamente diminuída, aumentando assim o número de ciclos da bateria.

O gráfico da Figura 2-7 compara a ultrabateria com uma bateria com a bateria VRLA em termos de eficiência ao longo da descarga. É possível observar que, para descargas muito altas de 90% (estado de carga de 10%), a bateria ALAB (ultrabateria) atinge ainda uma eficiência de 93%, ao passo que a bateria VRLA possui um valor mais baixo de aproximadamente 89%. Já na Figura 2-8 apresenta uma comparação do tempo de vida da bateria (em número de ciclos), onde se observa que a capacidade total de armazenamento da bateria desce para aproximadamente 60% no caso da bateria VRLA e, para a ultrabateria esta capacidade desce para aproximadamente 90% apenas ao final de 15000 ciclos.

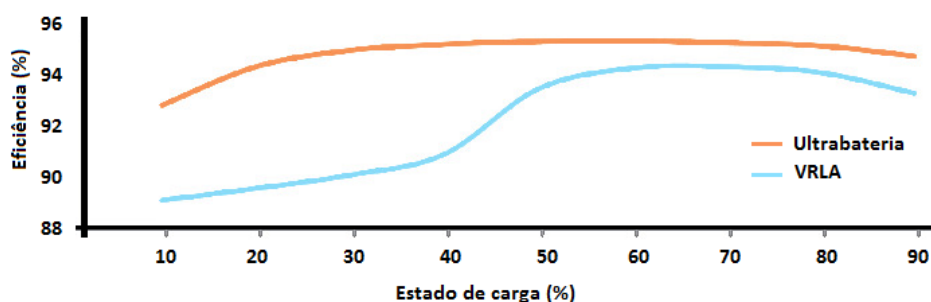


Figura 2-7: Comparação da eficiência ao longo da descarga de ambas as baterias ALAB e VRLA, adaptado de [41].



Figura 2-8: Comparação da capacidade da bateria e o tempo de vida (número de ciclos) de ambas as baterias ALAB e VRLA, adaptado de [41].

2. Baterias de metal líquido

Esta bateria está a ser atualmente desenvolvida por uma equipa coordenada pelos professores Donald Sadoway e David Bradwell do MIT que, a par com Luis Ortiz são os fundadores da *Liquid Metal Battery Corporation* (LMBC), uma empresa fundada em 2010 na cidade de Cambridge nos EUA, com o intuito de desenvolver novas variedades de baterias elétricas que permitam aplicações de escala comercial para redes elétricas [42].

A bateria de metal líquido é formada por dois elétrodo constituídos por metais no estado líquido, e um eletrólito de sais fundidos, que se separam espontaneamente devido à diferença de densidades existente entre eles e à sua imiscibilidade [42]. O diagrama de uma bateria deste tipo está apresentado na Figura 2-9.

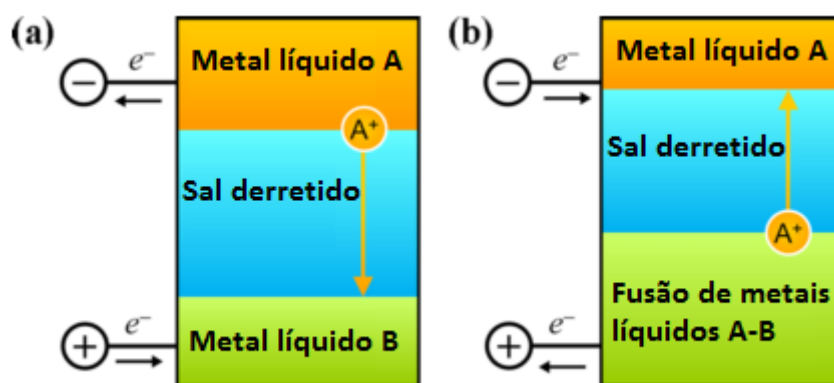


Figura 2-9: diagrama de uma bateria de metal líquido em modo de descarga (a) e carga (b), adaptado de [42].

Os metais candidatos a elétrodo estão apresentados na tabela periódica da Figura 2-10, e estão limitados por três requisitos [42]:

- 1) Estado líquido a temperaturas práticas, isto é a temperatura de fusão deve ser inferior a 1000 °C e a temperatura de ebulição superior a 25 °C;
- 2) Ambos devem possuir condutividade elétrica, mais elevada que a condutividade elétrica do eletrólito ($\sigma > 1 \text{ S/cm}$);
- 3) Não radioativos, isto é, disponíveis na forma de um isótopo estável de ocorrência natural.

1																	18
H	2											13	14	15	16	17	He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba		Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn

Figura 2-10: Tabela periódica. Assinaladas as diferentes possibilidades de elétrodo negativo (amarelo) e positivo (verde) [42].

Estas baterias possuem diversas vantagens, onde se destaca o custo, a capacidade e o número de ciclos. As baterias de metal líquido possuem baixo custo porque, na sua maioria, os candidatos a elétrodo são baratos e abundantes na natureza. Além disso, o facto de existir uma separação espontânea entre os componentes permite reduzir ainda mais o custo da construção por não ser necessária uma membrana que separe os elétrodo do eletrólito. Para além desta vantagem a nível económico, estas baterias possuem elevado número de ciclos devido à constante criação e destruição de elétrodo durante o ciclo de carga e descarga. Esta característica confere às baterias o seu elevado número de ciclos, tornando-as imunes à degradação microestrutural do elétrodo, que limita o ciclo de vida da maior parte das baterias [42].

Apesar das suas vantagens, esta bateria possui diversas desvantagens, tais como a sua elevada temperatura (muitas vezes acima dos 500 °C), baixa densidade de energia (tipicamente abaixo dos 200 Wh/kg), elevada possibilidade de corrosão e ainda elevada auto-descarga para alguns conjuntos de elétrodo, devido à solubilidade dos elétrodo no eletrólito. Para além destas desvantagens, o facto de ser constituída por três camadas líquidas, torna esta bateria sensível ao movimento e potencialmente perigosa caso exista contacto direto entre os elétrodo, levando a um curto-circuito com elevada geração de calor [42]. Consequentemente, esta bateria é considerada inadequada para aplicações móveis sendo, no entanto, bastante promissora para aplicações estacionárias.

3. Baterias de íão de lítio

As baterias de íão de lítio são baterias secundárias recarregáveis famosas pela sua diversidade e versatilidade. Esta tecnologia foi introduzida pela Sony nos anos 90 baseando-se no uso de compostos intercalados de lítio (Li⁺) [43].

As baterias de íões lítio são utilizadas em diferentes aplicações, sendo especialmente indicadas para o transporte e dispositivos eletrónicos devido à sua elevada densidade de energia e baixa temperatura de operação (entre -40 a 65°C) quando comparada às restantes [39, 44].

O ciclo de vida destas baterias é de tal modo elevado que alguns telemóveis já possuem uma bateria de íões lítio não removível, no qual é aconselhado não deixar a bateria descarregar completamente [45]. Assim, o seu ciclo de vida é tipicamente 3000 ciclos no caso da profundidade de descarga ser de 100%, podendo aumentar significativamente de acordo com a profundidade de descarga, chegando aos 20000 ciclos no caso da profundidade de descarga ser entre 20 a 40%. Quando comparada com outras baterias, possui uma baixa taxa de auto-descarga (2 a 10% por mês sendo que este valor aumenta com a temperatura), não possui efeito de memória acentuado e tem um tempo de vida útil de aproximadamente 5 anos. Assim, as baterias de íões lítio são consideradas uma boa opção para aplicações portáteis ainda que não estejam restringidas a este tipo de aplicações.

Embora as vantagens sejam atrativas, as baterias de íão de lítio possuem duas grandes desvantagens: em primeiro lugar, o lítio é um elemento muito reativo e, portanto, encontra-se sempre combinado com outros elementos, sendo necessária a sua extração¹⁰. O segundo problema é a nível de segurança: estas baterias são muito inflamáveis podendo até explodir a temperaturas superiores a 65°C [46].

Ainda que estas baterias sejam já muito utilizadas e tenham rapidamente ultrapassado as restantes opções para aplicações eletrónicas, continuam a ser desenvolvidos métodos para melhorar em especial a sua densidade e segurança, e número de ciclos, para que possa ser mais viável em aplicações de transporte.

4. Baterias de níquel-cádmio

A seguir às baterias de chumbo-ácido, as baterias de níquel-cádmio (NiCd) são as mais utilizadas quer para aplicações industriais quer para produtos comuns de eletrónica, como comandos de televisão, etc. Recentemente estas baterias tornaram-se populares no mundo da energia solar, devido à sua capacidade de funcionamento a temperaturas elevadas, podendo atingir temperaturas até 50°C sem se danificarem [40]. Estas baterias, ao contrário das baterias de chumbo-ácido, possuem um elevado número de ciclos de vida e um curto tempo de reação, dependendo do tipo de utilização.

A sua principal desvantagem é, sem dúvida o seu custo. No entanto, também apresentam elevados efeitos de memória¹¹ e de auto-descarga. É também ainda importante referir que este tipo de baterias traz preocupações a nível ambiental no seu fim de vida, visto que o cádmio é um material tóxico [39].

5. Baterias de sódio-enxofre

Uma bateria de sódio-enxofre (NaS) possui elétrodo constituídos essencialmente por sódio e enxofre. Os sais de sódio são bastante abundantes na natureza, pelo que são comparativamente baratos e de fácil extração. O enxofre é também fácil de obter e de custo reduzido, fazendo com que esta bateria tenha elétrodo baratos. O problema de uma célula com tais elétrodo é encontrar um eletrólito adequado. Uma vez que ambos os elétrodo são líquidos, esse não poderia ser o estado do eletrólito. A alternativa foi encontrada no material cerâmico beta-alumina que é um isolante eletrónico com alta condutividade iónica para íões de sódio acima dos 270 °C [39]. Uma vez que esta temperatura mantém ambos os elétrodo no estado líquido e garante uma alta condutividade iónica do eletrólito, foi considerada como a temperatura mínima de operação. Esta célula é completamente fechada e nenhum gás é libertado durante o seu funcionamento.

Esta bateria possui várias vantagens tais como o seu elevado rendimento, elevada densidade de energia e a sua baixa necessidade de manutenção. O número de ciclos de vida é superior ao das baterias de NiCd e de Chumbo-Ácido. Uma das características que torna o seu uso mais vantajoso é a flexibilidade de fornecer tanto descargas constantes e suaves como descargas curtas de elevada intensidade – algo desejado em numerosas aplicações.

¹⁰ O lítio pode ser extraído das águas de nascentes minerais, depósitos e poços de salmoura, sendo ainda possível produzi-lo via eletrólise através de uma mistura fundida de 55% cloreto de lítio e 45% de cloreto de potássio a elevadas temperaturas.

¹¹ O efeito de memória é o efeito que ocorre quando se carrega uma bateria parcialmente descarregada. Isto por si leva a reações colaterais, onde são produzidos compostos químicos que não entram na obtenção de energia útil. Diminuindo posteriormente a capacidade de armazenamento das baterias [100].

A maior desvantagem destas baterias é sem dúvida a necessidade de manter a temperatura de funcionamento acima dos 270°C [39]. Desvantagem não só pelo consumo de energia mas também devido a outros problemas tais como a manutenção da temperatura e procedimentos de segurança [43]. A elevada temperatura pode levar à auto-descarga da bateria uma vez que os isolantes elétricos podem começar a conduzir eletricidade.

2.5.2 Baterias de fluxo

As baterias de fluxo regenerativas são sistemas de dois eletrólitos, ambos no estado líquido. Estas baterias armazenam e libertam energia elétrica por intermédio de reações eletroquímicas reversíveis entre dois eletrólitos de soluções salinas, que ocorrem através da membrana da pilha de combustível regenerativa [47]. Como ilustrado na Figura 2-11, os eletrólitos circulam em dois circuitos separados e são posteriormente encaminhados para a célula. Esta célula contém dois eletrodos e uma membrana de troca de iões. Num primeiro eletrodo ocorre a reação de meia-redução que extrai os eletrões e os iões do eletrólito, posteriormente num segundo eletrodo ocorre a reação de meia oxidação com o intuito de recombinar os eletrões e iões provenientes do primeiro eletrodo. Os iões migram de um eletrodo para o outro (do ânodo para o cátodo) através de um eletrólito impermeável a eletrões que faz com que estes estejam então forçados a circular num circuito externo, fornecendo assim energia elétrica.

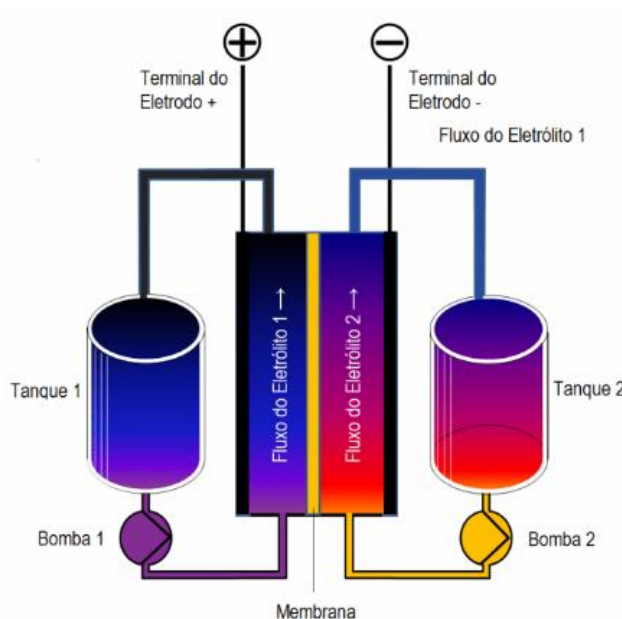


Figura 2-11: Diagrama de uma bateria de fluxo regenerativa [4].

Este tipo de bateria não tem as limitações das baterias tradicionais, as quais estão limitadas pela área de superfície dos componentes sólidos das reações químicas. Por este motivo, têm sido estudados e desenvolvidos diferentes tipos de eletrólitos usando o bromo como elemento comum em conjunto com o zinco (ZnBr), sódio (NaBr), vanádio (VBr), polisulfito de bromo (NaS-NaBr).

Uma das suas grandes vantagens é a facilidade de aumentar a capacidade de armazenamento, sendo tal possível simplesmente com o acréscimo de tanques de eletrólito. Isto torna-se, por outro lado, uma

desvantagem por ser difícil de manusear relativamente à fração de energia armazenada – volume [4] e elevados custos de manutenção [3].

2.6 Sistemas térmicos

Os sistemas de armazenamento de energia térmica (TES) armazenam calor. Com estes sistemas é possível responder às necessidades de diversos setores – comercial, industrial e utilidades – em diferentes aplicações tais como a produção de eletricidade, aquecimento direto de ambiente e água, refrigeração e ar condicionado. Os sistemas de armazenamento de energia térmica podem ser utilizados durante todo o ano. Durante o verão armazenam o calor para o aquecimento de espaços e, no inverno, armazenam o frio para que este seja utilizado no verão para arrefecimento. Além disto, estes sistemas são também utilizados para acumular eletricidade retirada (ou não) da rede elétrica durante horas de vazio em que as tarifas são mais baixas. Para este efeito, por exemplo, refrigeradores são ligados durante a noite para arrefecer ar que é posteriormente acumulado para ser depois utilizado durante o dia em horas de ponta/cheia em unidades de ar condicionado [2].

Existem essencialmente dois tipos de armazenamento térmico – armazenamento de calor sensível ou latente. Armazenamento de calor sensível é feito pelo aumento ou diminuição da temperatura de uma substância. O armazenamento de calor latente é feito por mudança de fase de uma substância, ou seja, transição de sólido para líquido ou de líquido para vapor sem consequente mudança de temperatura.

A utilização de sistemas TES é especialmente importante na redução do consumo de energia elétrica. Um projeto conjunto entre a China e os EUA demonstrou que um sistema TES instalado numa empresa pode reduzir significativamente o consumo de energia em horas de ponta. A demonstração foi feita numa empresa em Pequim onde se reduziu o consumo em cerca de 6100 kWh por mês em horas de ponta [48].

Ao contrário dos outros sistemas de armazenamento referidos anteriormente, os sistemas TES são maioritariamente utilizados no armazenamento e distribuição de calor/frio e não de eletricidade (ainda que possam e sejam utilizados nesta área também). Por esta razão não serão considerados durante os próximos capítulos, uma vez que esta dissertação pretende fazer a comparação entre tecnologias de armazenamento de energia elétrica exclusivamente. A utilização de TES para outros fins torna difícil a sua comparação com os restantes sistemas de armazenamento ainda que se reconheça a importância e o impacto que este sistema possui nos diversos campos de aplicação referidos.

2.7 Conclusões preliminares

Durante este capítulo foi estudado o estado da arte de diferentes tecnologias de AEE. Existem diversas maneiras de armazenar a energia: armazenamento de energia mecânica, térmica, elétrica, eletroquímica e química. É fundamental que exista um melhoramento das características das tecnologias AEE de modo a aumentar a eficiência, a duração da vida útil, e diminuição dos seus custos. Cada tecnologia possui um conjunto de características que a torna pouco adequada a algumas aplicações e muito indicada para outras. A diversidade das características operacionais torna importante a escolha do sistema AEE mais indicado para cada campo de aplicação.

Quais são as características mais indicadas para cada campo de aplicação? E, sabendo estas características, quais são as tecnologias AEE mais indicadas? Estas são as perguntas que o próximo capítulo pretende responder.

3 Características operacionais e campos de aplicação

Neste capítulo será efetuada uma comparação entre as diferentes tecnologias estudadas anteriormente com o objetivo de perceber quais as tecnologias mais indicadas para cada campo de aplicação e que servirá para elaborar alguns dos indicadores de sucesso a estudar. Começa-se com uma subsecção que enuncia os principais campos de aplicação a estudar. Seguidamente resumem-se as principais características que distinguem os sistemas de armazenamento e que serão utilizadas para a comparação entre as diferentes tecnologias. Nas subsecções seguintes será feito um estudo mais aprofundado de cada campo de aplicação com o objetivo de justificar quais as melhores e mais promissoras tecnologias para cada campo. Finalmente, na última subsecção apresentam-se as conclusões preliminares.

3.1 Campos de aplicação

A comparação de sistemas de armazenamento tem por objetivo entender quais os sistemas mais indicados para cada um dos campos de aplicação. Nenhuma tecnologia de armazenamento de energia consegue ter as características necessárias a todos os campos de aplicação que existem; alguns campos requerem características opostas. O campo de aplicação em que a tecnologia se insere dita o tipo de características que são mais importantes.

Luo et al. [2] elaboram um estudo interessante sobre os sistemas de armazenamento mais adequados para cada campo de aplicação, fazendo a seguinte divisão: campos de aplicação principais (gestão de energia, qualidade de energia e fornecimento ininterrupto) e campos de aplicação mais específicos nos quais são incluídos a gestão de reservas, suavização de intermitência de renováveis, setor de transportes, utilização de renováveis como reserva, etc. No entanto, no decorrer desta dissertação entendeu-se que seria mais adequado efetuar uma divisão que fosse ao encontro das principais características que os distinguem. Assim, a divisão das tecnologias será feita da seguinte maneira:

- **Sistemas para aplicações estacionárias:** para apoio à rede elétrica na gestão e qualidade de energia, e para a integração de renováveis através da diminuição de intermitência.
- **Sistemas para aplicações móveis:** para o transporte (veículos) e utilização de equipamentos eletrónicos de pequenas dimensões (computadores, telemóveis etc.).

De seguida será feita a análise dos sistemas mais indicados para campos de aplicação estacionários e móveis tendo em conta as principais características que os distinguem. As características técnicas a analisar estão apresentadas na Tabela 3-1 e posteriormente as definições dos conceitos técnicos estão descritas no Anexo A.1: Características operacionais utilizadas.

Tabela 3-1: Características operacionais das tecnologias de AEE a estudar.

Tecnologias	Energia específica (Wh/kg)	Potência específica (W/kg)	Capacidade potência (MW)	Capacidade energia (MWh)	Auto-descarga diária	Número de ciclos	Tempo vida (anos)	Eficiência (%)	Tempo resposta	Tempo de descarga
PHS	0.5-1.5	-	100-5000	500-8000	Muito baixa	10,000-30,000	40-60	70-85	min	1-24h
CAES subterrâneo	30-60	-	110 e 290 [49]	580 e 2860 [49];	Baixa	8000-12,000	20-40	42-54 (AA-CAES 70)	min	1-24h
CAES superfície	130 (300 bar) [50]	-	0.003-3; ~10*[51]	~0.01	Muito baixa	30,000 (teste)	23+	-	s-min	30s-40min
Volante inércia	5-100 [52]	400-1500	0.1-20 [53]	até 5 [54]	100%;	20,000+	~15	~90-95	s	15s-15min
SC	~2.5-15	500-10,000	0.3	0.01	20-40%	100,000	20-40	90-97	ms	ms-1h
SMES	0.5-5	500-2000	0.1-100	0.015-1000	10-15%	100,000	20+	95-98	ms	ms-30min
Célula H2	800-10,000	5-800	<50	0.312; 39	Quase 0%	20,000+	5-20	25-50	s	s-24h
Chumbo-ácido	30-50	75-300	0-40 [55]	0.001-40 [56]	0.1-0.3%	3000	5-15	70-80	ms	s-10h
Ião de lítio	75-200	150-2000 [52]	16	~0.004-20	0.1-0.3%	1000-20,000	5-15	90-97	ms	~1-8h
Metal líquido	-	-	0.1-5000	0.2-100+	-	100,000	15	70+	ms	~1-8h
NaS	150-240	90-230 [57]	<34 [55]	0.4-244.8[58]	Quase 0%	4500	10-15	75-90	-	~s-1h
NiCd	50-75	150-300	0-40	6.75 [52]	0.2-0.6%	3500	10-20	60-83	ms	~1-8h
Fluxo	10-30	166 [59]	2-100	6-120	Muito baixa	13,000+	5-20	75-85	ms	~s-24h
TES	80-250	10-30	0.1-300	-	0.05-1	-	5-30	30-60	Muito alto	~1-8h

Nota: características não aplicáveis ou sem informação assinaladas com -. Fonte: [2, 4, 42, 60].

3.2 Tecnologias para aplicações estacionárias

Os sistemas de armazenamento para aplicações estacionárias possuem um conjunto de características que os torna diferentes dos sistemas móveis, sendo, em geral, sistemas robustos e de grande porte. Estes sistemas são avaliados, em geral tendo em conta o seu tempo de resposta, a sua capacidade de potência e tempo de descarga [2].

Serão considerados dois tipos de sistemas estacionários: os que fornecem suporte à rede e os que ajudam o aumento da integração de energias renováveis no *mix* energético do sistema electroprodutor. O esquema da Figura 3-1 indica os campos de aplicação que serão considerados na dissertação.

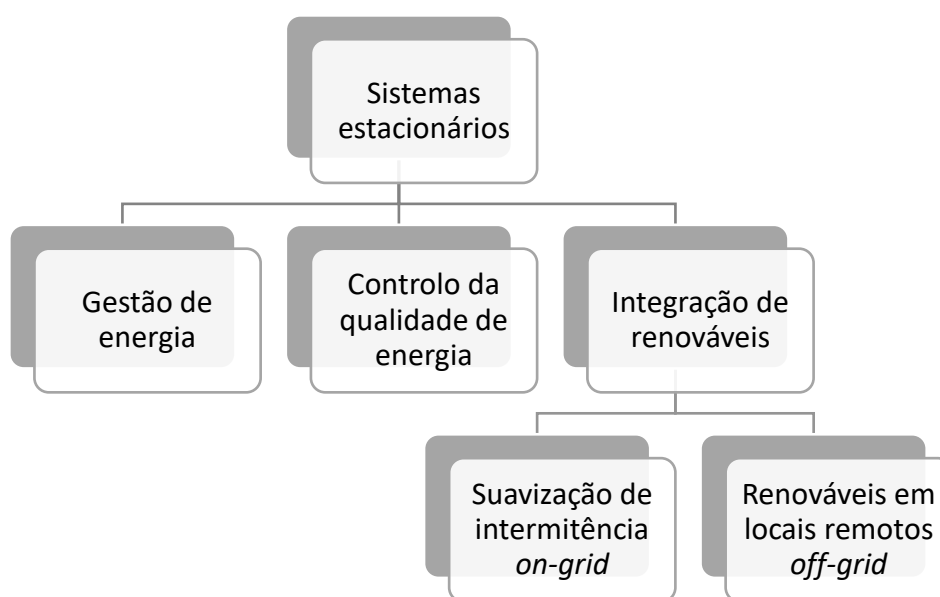


Figura 3-1: Diferentes sistemas estacionários a estudar proposto pela dissertação.

Sistemas de AEE para a gestão de energia são utilizados com o objetivo de armazenar a energia produzida em alturas de pouco consumo e utilizá-la em alturas de elevado consumo. Isto ajuda a nivelar o diagrama de cargas de uma forma mais eficiente sem que seja necessária a produção de energia extra [3]. Além disto, a adição de unidades de AEE com o intuito de gerir a produção de energia a nível nacional diminui a necessidade de exportação de energia produzida em excesso que seria vendida possivelmente a custo reduzido (mais barata que o custo da sua produção) a países vizinhos, e a importação de energia extra em horas de ponta em alturas de emergência comprada a um custo superior.

Do ponto de vista da rede elétrica e do fornecedor, armazenar energia nos períodos de vazio permite a sua utilização nos períodos de ponta e cheia assegurando uma diminuição na flutuação do preço da eletricidade e ao mesmo tempo garantindo um fluxo de eletricidade na rede elétrica constante ao longo do dia. Do ponto de vista do consumidor, os sistemas de armazenamento também proporcionam uma solução fiável a nível financeiro com o armazenamento de energia nos períodos de vazio (através do carregamento da bateria com energia da rede – compra – ou carregamento da bateria com a energia produzida pelos painéis solares instalados pelo consumidor) e a injeção desta energia na rede (venda) nos períodos de cheia/ponta.

No que toca ao controlo de qualidade da energia elétrica, atualmente existem diversos problemas que levam à necessidade de utilizar os sistemas AEE. A interrupção do fornecimento é um dos problemas mais graves pois afeta todos os equipamentos ligados à rede. Outros problemas

como distorção harmónica, interferência eletromagnética, flutuações de tensão e sobretensões/subtensões momentâneas podem levar a operação incorreta de alguns equipamentos podendo danificá-los [61].

A instalação de suficientes unidades de armazenamento próximas dos consumidores permite o contínuo fornecimento de energia durante um determinado período de tempo mesmo quando a rede não se encontra operacional. A ocorrência de congestionamentos (devido a restrições de limite de capacidade das redes) pode ser resolvida também com a implementação de unidades de AEE em subestações, permitindo o armazenamento quando as linhas se encontram com capacidade suficiente e posteriormente libertando essa energia quando as linhas não se encontram disponíveis devido ao congestionamento.

As tecnologias AEE possuem um outro papel também muito importante: apoiar a integração de fontes de ER na rede elétrica. No caso de um sistema de produção de energia que integre renováveis, para além das perturbações provenientes da procura de energia, é necessário ter em conta também as perturbações de carácter aleatório (intermitência).

A utilização de sistemas AEE permite a absorção da energia produzida em excesso e a sua posterior libertação em alturas de maior necessidade sem qualquer custo adicional, podendo reduzir ainda mais os custos de produção de energia a nível global. Além da sua integração na rede elétrica, as tecnologias AEE podem ser utilizadas em locais remotos sem acesso à rede elétrica em que se utiliza maioritariamente energia renovável. Num local remoto que não detenha ligação à rede elétrica, o fornecimento de energia pode ser feito com recurso à produção de energia por fontes renováveis que, com o suporte de armazenamento e gestão adequado, poderá fornecer energia ao local continuamente.

De seguida serão analisadas as características mais importantes para cada campo de aplicação referido e, posteriormente, serão analisadas as tecnologias que mais se adequam a estes campos de aplicação.

3.2.1 Tecnologias AEE para gestão de energia

Os sistemas de armazenamento têm um papel importante na rede elétrica principalmente na gestão de energia e no controlo de qualidade de energia entregue ao consumidor.

As características mais importantes serão neste caso: capacidade de potência, tempo de descarga, e auto-descarga. Em termos de capacidade de potência, é possível avaliar a gestão de energia em escalas diferentes – grande e pequena/média escala. Instalações de pequena/média escala requerem uma potência entre 1 e 100 MW ao passo que, para aplicações de grande escala, a potência tem de ser superior a 100MW [2]. Além disto, a gestão de energia é caracterizada pela necessidade de um tempo de descarga elevado, sendo o ideal que esteja compreendido numa escala de horas e dias e uma auto-descarga baixa.

I. Gestão de energia grande escala

Pela análise da Tabela 3-1, percebe-se que os sistemas mais indicados para este campo de aplicação são sem dúvida a bombagem, o sistema CAES subterrâneo. Além destes, há a possibilidade de utilização baterias de fluxo e de metal líquido.

Os sistemas de bombagem são atualmente dos mais utilizados na gestão de energia. O gráfico apresentado na Figura 3-2 revela que cerca de 99% da capacidade de armazenamento instalada a nível global é feito através da bombagem. Existe uma grande variedade de sistemas de grande

escala construídos atualmente, entre os quais se destaca a PHS de Bath County com cerca de 3GW de potência, considerada a maior a nível mundial.

No que toca às centrais CAES subterrâneo de grande escala, existem atualmente duas instaladas. A primeira, na Alemanha (Huntford), demora 8h por dia a carregar e consegue estar a operar 2h à potência máxima que é de 290MW. Esta central possui um papel muito importante pois oferece elevada potência em alturas de emergência/apagões. Outra central de grande escala é a de McIntosh, que opera até 26h à potência sua máxima de 110MW.

As baterias de fluxo e de metal líquido são dois tipos recentes de baterias que permitem, ao contrário das restantes baterias, ser utilizadas a grande escala e ultrapassar os maiores problemas das hidroelétricas com bombagem e dos sistemas de ar comprimido, por não necessitarem de locais específicos de construção.

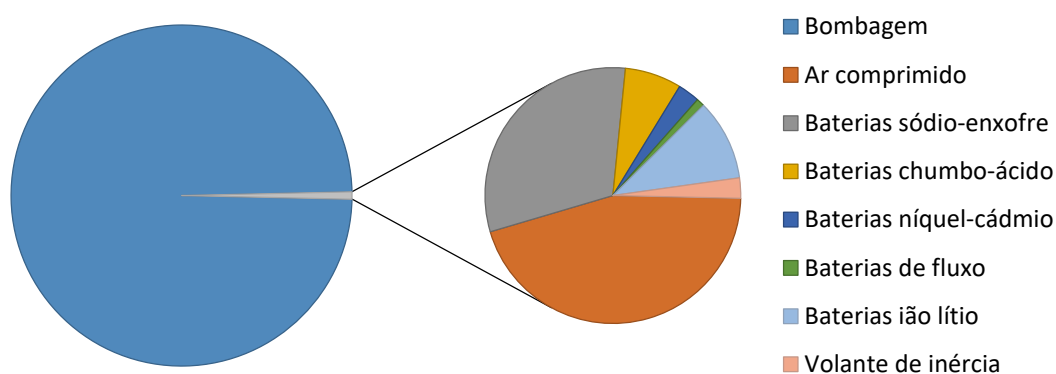


Figura 3-2: Capacidade total instalada na rede elétrica a nível mundial de diferentes tecnologias de armazenamento de energia elétrica em diferentes campos de aplicação, adaptado de [62]

II. Gestão de energia pequena/média escala

Pela análise da Tabela 3-1 e, tendo em conta as características necessárias para a gestão de energia de pequena/média escala, considera-se uma grande variedade de tecnologias. Embora os sistemas de bombagem e CAES subterrâneo sejam largamente utilizados para a grande escala, estes são pouco viáveis para a pequena/média escala por necessitarem de reservatórios de grandes dimensões cuja construção só é economicamente viável em grande escala. Ainda assim, o CAES subterrâneo pode-se tornar uma opção se não forem utilizadas cavernas subterrâneas. A título de exemplo, alguns investigadores começaram a estudar a viabilidade de outras formas de reservatórios para o armazenamento do ar. Este estudo conduziu a um teste prático de uma instalação de 2 MW através da utilização de tuneis de betão para o armazenamento de ar comprimido numa mina abandonada no Japão. Ainda assim os resultados demonstraram que estes tuneis subterrâneos não seriam viáveis devido à existência de problemas de tensão que resultariam mais tarde em fendas nos tuneis provocando no melhor dos casos perdas significativas e, no pior dos casos, o colapso do reservatório [63].

Outra das tecnologias que não será considerada para a gestão de energia de pequena/média escala é a dos supercondensadores, devido aos seus baixos valores de potência (<1 MW), não sendo suficientes para uma gestão energética eficiente. É também possível verificar que o tempo de descarga de algumas tecnologias é demasiado baixo para que possam ser consideradas, nomeadamente os supercondutores magnéticos e o volante de inércia que, além de baixo tempo de descarga, possui ainda uma auto-descarga muito alta. Assim, para sistemas de pequena/média escala existe uma escolha mais variada do que para grande escala, tendo em conta as características

discutidas: CAES superfície, células de combustível de hidrogénio, baterias de chumbo-ácido, ião de lítio, metal líquido, NaS, NiCd e de fluxo.

O CAES tem sofrido diversas modificações e evoluções nos últimos anos. Atualmente pode ser utilizado na rede elétrica como alternativa às baterias eletroquímicas, servindo como sistema de reserva em caso de emergência.

Dentro dos sistemas de baterias eletroquímicas, um dos sistemas mais utilizados são as baterias de chumbo-ácido. Dois exemplos de duas instalações de baterias de chumbo-ácido são a instalação em Porto-Rico (20MW/14MWh) e Berlim (8.5 MW/8.5 MWh) utilizados essencialmente como reserva girante [2]. As baterias NaS são, em termos técnicos, consideradas como as mais promissoras para o apoio à rede elétrica com o objetivo principal de nivelar a carga e a produção de energia. Uma das maiores instalações deste tipo foi feita na ilha Abu Dhabi e conta com 40 MW. Outra tecnologia promissora mas recente é a bateria de fluxo, existem já algumas baterias deste tipo construídas para este campo de aplicação, como por exemplo o sistema instalado no Japão com 500 kW/5 MWh e a instalação nos EUA 250 kW/2 MWh, ambas utilizadas principalmente para a diminuição dos picos de procura [64]. As baterias NiCd encontram-se ultrapassadas e não existem projetos para construção. Embora já se encontrem ultrapassadas, existe um sistema ainda em funcionamento de baterias de NiCd, instalado em Golden Valley no Alaska. Este sistema de armazenamento atua como parte da reserva girante, podendo fornecer 27 MW durante 15 minutos e cerca de 40 MW durante 7 minutos [65]. As baterias de ião de lítio são utilizadas em diversos campos de aplicação devido às suas características. Entre os diversos projetos, destaca-se o projeto no Reino Unido com cerca de 6 MW/10 MWh[66]. As baterias de metal líquido são muito recentes, não existindo ainda instalações em operação, no entanto as suas características técnicas fazem com que sejam uma boa escolha pra este campo de aplicação.

Finalmente, as células de combustível que começam a ser utilizadas em especial na Europa. Projetos como Sapphire (Noruega), SmartCat (França), RE4CELL (Espanha), IdealHy (Países Baixos), etc. são exemplos de sistemas que pretendem integrar as células de combustíveis neste tipo de aplicações.

3.2.2 Tecnologias AEE para controlo de qualidade de energia

As tecnologias para o controlo de qualidade de energia necessitam de ter um tempo de resposta muito rápido na ordem dos milissegundos e necessitam de libertar a energia armazenada em alguns segundos ou poucos minutos. A potência destes sistemas não necessita de ser elevada, podendo ser inferior a 1 MW. Adicionalmente é necessário que possuam um número de ciclos elevado pois poderá existir a necessidade de realizarem vários ciclos por dia. Esta última característica também implica que o sistema tenha uma elevada eficiência de forma a minimizar as perdas de cada ciclo carga/descarga.

Inicialmente serão analisadas as características limitantes: tempo de resposta e tempo de descarga. De acordo com Tabela 3-1, retiram-se os sistemas de bombagem e CAES por ao tempo de resposta ser inferior a alguns segundos e o seu tempo de descarga ser muito elevado. Entende-se que as tecnologias com melhores características para esta aplicação são os volantes de inércia, supercondensadores, SMES devido às suas características únicas de rápido tempo de descarga e elevada eficiência necessárias para garantir o controlo de frequência e tensão necessário. Outras tecnologias que pode vir a ser importantes são as baterias de fluxo, metal líquido, NaS e as células de combustível cujo tempo de descarga pode variar entre alguns segundos a várias horas. No entanto, atualmente a utilização de células de combustível e de baterias NaS para esta aplicação não é viável devido à sua baixa eficiência e baixo número de ciclos respetivamente.

Exemplos de instalações de sistemas de armazenamento para o controlo da qualidade de energia na rede são os de baterias de fluxo instalados pela SEI no Japão (1.5 MW/3 MWh), o sistema de baterias chumbo-ácido BEWAG em Berlim (8.5 MW/8.5 MWh) e os sistemas da companhia Beacon Power que instala volantes de inércia (150 kW por unidade, 20 MW/5 MWh por sistema) em diversas partes do mundo para a regulação de frequência e controlo de qualidade da energia.

3.2.3 Tecnologias AEE para integração de renováveis

Qualquer que seja a tecnologia de armazenamento escolhida, é necessário que esta não reduza o retorno energético dos sistemas de produção. O retorno energético em energia investida, também conhecido por EROI (*Energy Return on Investment*) é a relação entre a quantidade de energia que o sistema de geração produz ao longo do seu tempo de vida útil e a energia gasta na sua construção e instalação. O valor EROI de um dispositivo de geração ($EROI_g$) é dado pela expressão (3-1) [1]:

$$EROI_g = \frac{\text{Energia produzida pelo sistema}}{\text{Energia utilizada para construção e instalação}} = \frac{1}{\varepsilon_g} \quad (3-1)$$

Onde ε_g é a intensidade energética.

De forma semelhante, as tecnologias de armazenamento possuem um valor ESOI (*Energy Stored on Energy Invested*), que relaciona a energia total armazenada e fornecida no tempo de vida útil da tecnologia AEE com a energia necessária investir para a construção e instalação do mesmo, e é dado pela expressão (3-2) [1]:

$$ESOI = \frac{\gamma \eta \times DoD}{\varepsilon_e} = \frac{1}{\varepsilon_s} \quad (3-2)$$

Onde γ é o número de ciclos, η a eficiência, ε_e é o valor de energia utilizada para construir e para instalar a tecnologia de armazenamento e ε_s é a intensidade energética total deste sistema.

Posteriormente, dependendo da fração média de energia a armazenar (ou desperdiçar) produzida em excesso, ϕ , existem sistemas mais (ou menos) viáveis. Como demonstrado em [1], a decisão entre armazenar ou suspender a produção de energia está dependente da seguinte condição [1]:

$$\frac{ESOI}{EROI_g} \begin{cases} > 1 - \phi \Rightarrow \text{Armazenar} \\ < 1 - \phi \Rightarrow \text{Suspender} \end{cases} \quad (3-3)$$

Nesta dissertação será assumido que, para sistemas *off-grid*, em que a população está dependente da geração de ER para o fornecimento de eletricidade, esta percentagem ultrapassa os 30%, ao passo que para sistemas *on-grid*, em que a utilização de armazenamento serve para suavizar a intermitência da ER que entra na rede, o valor de ϕ seja inferior a 10%. De seguida estudam-se as características mais importantes que um sistema de armazenamento deve possuir para a integração de renováveis em locais remotos e na rede, sendo para cada um dos casos feita a análise do retorno energético.

I. *Off-grid*: renováveis em locais remotos sem acesso à rede

A produção de energia elétrica em locais isolados ou remotos impõe dificuldades às comunidades instaladas nestes locais, bem como aos respetivos governos, dado o elevado custo e

difícil abastecimento de matérias-primas. O aproveitamento das fontes de ER constitui assim uma forte alternativa aos sistemas de produção atuais, baseados em combustíveis fósseis, por permitirem reduzir a dependência desses locais de fontes exteriores de energia [67]. Focando agora o tipo de energia produzida, serão consideradas duas situações: a produção de energia solar fotovoltaica (PV) e a produção de energia eólica.

Locais com elevado aproveitamento de energia solar fotovoltaica (PV) requerem um sistema de armazenamento que consiga fornecer, durante períodos noturnos, a energia extra armazenada durante o dia. De forma semelhante, locais onde estão instaladas turbinas eólicas requerem sistemas de armazenamento que acumulem a energia extra em períodos de grande produção eólica para a libertar em períodos sem vento. Além disto, é necessário considerar situações em que as condições meteorológicas não permitem o armazenamento de energia extra, como por exemplo dias nublados ou de chuva (no caso de PV onde existe pouca energia solar produzida), ou vários dias com pouco vento (no caso da energia eólica). Desta forma, o sistema de armazenamento necessita de um tempo de descarga entre várias horas a vários dias, capacidade de potência elevada para que possa libertar a energia necessária no período de tempo adequado, muito baixa auto-descarga, pois a energia terá de ser armazenada durante o dia e libertada durante a noite ou, em alguns casos, armazenada durante vários dias em que exista uma produção de energia mais elevada que o consumo.

Tendo em conta estas características operacionais (auto-descarga, capacidade de potência e tempo de descarga), os sistemas que mais se adequam a este armazenamento são, em teoria, a bombagem, CAES subterrâneo, células de combustível, baterias de ião de lítio, chumbo-ácido, metal líquido, fluxo, NaS e NiCd.

Porém, é possível que a utilização de algumas destas tecnologias cause uma redução no valor de retorno energético do sistema de geração. Os valores de ESOI das tecnologias de armazenamento com as características mais adequadas para armazenamento *off-grid* estão indicados na Tabela 3-2.

Tabela 3-2: Valores de ESOI das diferentes tecnologias de AEE indicadas e EROI da produção renovável.

Armazenamento	ESOI
PHES	1100
CAES subterrâneo	830
Célula H ₂	59
Chumbo-ácido	10 ¹²
Ião de lítio	35
Metal líquido	-
NaS	26
NiCd	7
Fluxo	14
Geração	EROI
Energia solar PV	8
Energia eólica	86

Fonte: [1, 68, 69].

¹² O valor utilizado aqui é retirado da referência [69], e diz respeito à bateria de chumbo-ácido avançada, sendo o valor da bateria de chumbo-ácido VRLA de 5.8 [68].

Nesta dissertação assume-se que em locais remotos o valor de ϕ será elevado devido à dependência que existe no local da fonte de energia renovável. Denota-se que, de acordo com a expressão (3-3), quanto mais elevada for a percentagem de energia armazenada ϕ , mais baixo será o valor $1 - \phi$, pelo que mais tecnologias poderão ser utilizadas.

No caso de geração eólica, por observação da Tabela 3-3, entende-se que as tecnologias de armazenamento mais adequadas são a bombagem e o CAES subterrâneo para qualquer valor ϕ . É importante relembrar que a bateria de metal líquido é ainda muito recente e a estimativa do seu valor ESOI não é ainda possível. No entanto, recorrendo à expressão 3-2 e, tendo em conta que o valor de ciclos atingido por esta tecnologia é de aproximadamente 100,000 e a sua eficiência e profundidade de descarga são de aproximadamente 70%, conclui-se que, mesmo que requeira um elevado valor de energia para a sua construção, o seu valor ESOI será sempre elevado. Diferentes estimativas deste valor estão apresentadas no anexo A.3: ESOI da bateria de metal líquido para diferentes cenários, e podendo ser comparadas com os valores de outras baterias eletroquímicas consideradas.

Caso o local remoto esteja dependente de energia solar, verifica-se que, na sua maioria, as tecnologias de armazenamento discutidas são adequadas para percentagens ϕ superiores a 30%, isto é, é sempre viável o armazenamento da energia produzida em excesso quando esta percentagem de energia produzida em excesso for superior a 30% do total de energia produzida pelo sistema PV. Isto porque o valor ESOI/EROI_g é superior a 1 para todas as tecnologias exceto para a bateria de NiCd, que deixa de ser uma opção viável para armazenamento se, em média, a energia produzida em excesso for inferior a 12%, para o qual é preferível suspender a produção.

Tabela 3-3: Valores de ESOI/EROI e decisão mais benéfica de um ponto de vista de retorno de energia.

Tecnologia	Energia Eólica		Energia Solar	
	ESOI/EROI _g	Decisão	ESOI/EROI _g	Decisão
PHES	12.79	Armazenar	137.50	Armazenar
CAES subterrâneo	9.65	Armazenar	103.75	Armazenar
Célula H₂	0.69	Suspender	7.38	Armazenar
Chumbo-ácido	0.12	Suspender	1.25	Armazenar
Ião de lítio	0.41	Suspender	4.38	Armazenar
Metal líquido	-	Armazenar	-	Armazenar
NaS	0.30	Suspender	3.25	Armazenar
NiCd	0.08	Suspender	0.88	Armazenar
Fluxo	0.16	Suspender	1.75	Armazenar

A razão por detrás destas decisões advém do facto de a energia eólica ter um retorno muito alto¹³, o que torna a sua energia bastante “barata”, não fazendo sentido a utilização de tecnologias de armazenamento com custo energético elevado, isto é baixo ESOI (por exemplo, baterias

¹³ O elevado retorno da energia eólica deve-se também ao facto de, em dias de vento, o recurso poder estar disponível todo o dia. Ao passo que, para a energia solar, mesmo em dias de sol, o recurso nunca se encontra disponível durante todo o dia, pois existe apenas sol durante uma fração do dia.

eletroquímicas), pois traduz-se numa redução do valor EROI do sistema de geração eólico para valores mais baixos que os valores EROI caso se corte a produção [1]. Assim, os sistemas mais adequados para este caso são a bombagem e o CAES subterrâneo, sendo discutível a possibilidade de utilizar baterias de metal líquido.

Em contrapartida, para a geração de energia solar sucede o oposto. Uma vez que o valor de retorno deste tipo de energia é mais baixo, isto é, possui um valor EROI mais baixo que a energia eólica, faz com que seja energeticamente mais custoso o corte de produção. Assim, para esta situação, a utilização de tecnologias de armazenamento com baixo valor EROI, traduz-se muitas vezes num retorno mais positivo do que o corte de produção.

II. *On-Grid*: suavização de intermitência de renováveis na rede elétrica

A energia que é produzida por fontes renováveis é, em muitos casos, variável no tempo/espaço e incontável¹⁴.

No que toca à diminuição de intermitência numa escala de segundos, as características são relativamente semelhantes ao controlo de qualidade de energia. No entanto, aqui há a necessidade que o sistema possua uma potência e um tempo de descarga superior pois as variações são mais elevadas. Assim, as principais características para esta aplicação são: capacidade de potência (na ordem dos 20 MW), tempo de resposta baixo (na ordem de segundos ou milissegundos) e um tempo de descarga a variar entre minutos e várias horas [2]. Para uma redução de intermitência numa escala maior, por exemplo de minutos, consideram-se válidas todas as características anteriores exceto o tempo de resposta que pode variar também numa escala de minutos.

Pela análise da Tabela 3-1, pode-se considerar que os sistemas CAES e de bombagem são pouco indicados para esta aplicação devido ao seu tempo de resposta relativamente elevado, sendo porém os sistemas mais indicados para a suavização da intermitência numa escala de tempo superior.

Seguidamente, pela avaliação do tempo de descarga, os sistemas de volantes de inércia são considerados pouco indicados devido à sua descarga em potência máxima ser de 15 minutos. Devido ao seu baixo valor de potência máxima, considera-se que para esta aplicação os sistemas EDLC são também pouco adequados. Assim, baterias eletroquímicas, os sistemas SMES e células de combustível são consideradas as mais apropriadas para este campo de aplicação.

Passa-se agora a avaliar estes sistemas em relação ao retorno de energia. Da mesma forma aplicam-se os resultados obtidos na Tabela 3-3 e, da mesma forma como acontece com as baterias de metal líquido, não foi possível estimar o valor EROI de sistemas SMES por falta de informação. As estimativas estão de igual modo apresentadas no anexo A.4: EROI da tecnologia SMES para diferentes cenários. No entanto acredita-se que o valor EROI desta tecnologia seja suficientemente elevado para se tornar benéfico o armazenamento.

A diferença, em comparação com a análise feita anteriormente, é o valor ϕ que agora passa a ser mais baixo sendo estimado nesta dissertação como inferior a 10%. Assim sendo, o valor de $\frac{EROI}{EROI_g}$ deverá ser superior a 0.9. Desta forma, para a energia eólica, em teoria, apenas as baterias de metal líquido poderão ser consideradas adequadas. E, para o caso da energia solar, as baterias NiCd deixam de ser adequadas e as baterias de ião de lítio e NaS são consideradas mais indicadas.

Exemplos de algumas instalações são por exemplo a instalação de baterias NaS Rokkasho no Japão (34 MW/244.8 MWh), de baterias chumbo-ácido Notrees nos EUA (26 MW/24 MWh),

¹⁴ Nem todas as energias renováveis são deste tipo. Por exemplo a energia hídrica é controlável e não variável. Exemplos de energia intermitente e variável são a energia eólica e solar.

baterias de lítio em Laurel Mountain (32 MW/8 MWh) e a instalação de baterias fluxo (2 MW/12 MWh) na Irlanda.

3.3 Tecnologias AEE móveis

A necessidade de reduzir as emissões de gases efeito de estufa, assim como a percepção de que o petróleo é um recurso finito e não renovável, tem alimentado o constante desenvolvimento de novos veículos elétricos independentes de combustíveis fósseis [70] ou que reduzam a sua utilização, reinventando a indústria com automóveis mais eficientes e motores elétricos que reduzem e, em alguns casos eliminam totalmente, o consumo de combustíveis fósseis e as emissões de gases efeito de estufa.

A aposta neste tipo de meios de transporte é bastante influenciada pelo preço do sistema de armazenamento utilizado em comparação ao preço do combustível. Atualmente, os veículos ICE dominam o mercado devido ao baixo preço do combustível utilizado. No entanto prevê-se uma subida dos preços de combustível para 2020 [71] e simultaneamente, uma descida dos preços dos sistemas de armazenamento [72]. Dentro dos diferentes veículos existentes que utilizam sistemas de armazenamento de energia, é possível verificar pelo gráfico da Figura 3-3 que se prevê que os veículos elétricos e os veículos híbridos se tornem competitivos num futuro próximo.

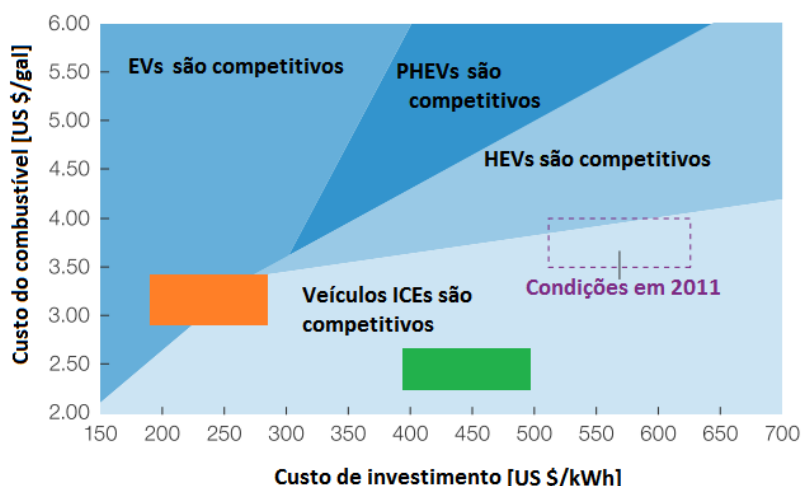


Figura 3-3: Competitividade dos diferentes tipos de veículos tendo em conta o preço da bateria e o preço do combustível, adaptado de [73]. O quadrado a verde indica a situação atual [74] e o quadrado a laranja indica uma aproximação da situação futura (~2020), tendo em conta possíveis desenvolvimentos tecnológicos dos sistemas AEE e a subida dos preços dos combustíveis fósseis [71].

Assim, dentro dos transportes, esta dissertação vai focar-se precisamente as tecnologias com maior potencial para evolução para estes veículos¹⁵. No entanto, as aplicações móveis não estão restritas a veículos. No dia-a-dia são utilizados diversos dispositivos eletrónicos (telemóveis, *tablets*, etc.) que estão dependentes da tecnologia de armazenamento utilizada.

¹⁵ O estudo de veículos a células de combustível não será realizado devido ao baixo nível de eficiência das células de combustível que tornam o FCEV pouco viável tendo em conta as características dos restantes tipos de veículos e à dificuldade em produzir hidrogénio atómico; sendo assim pouco provável que estes veículos estejam disponíveis no mercado num futuro próximo [2, 75]. Ainda assim, estudos desenvolvidos entre 2008 e 2013 [101, 102] sugerem a utilização de supercondensadores, baterias e volantes de inércia para aumentar as capacidades dos veículos a células de combustível. O estudo das características deste tipo de veículo não é incluído nesta dissertação pela falta de informação das suas características técnico-económicas.

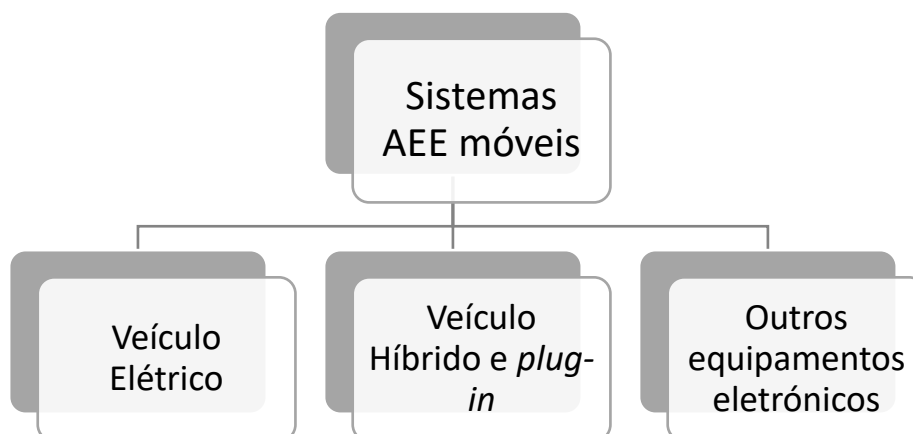


Figura 3-4: Diferentes sistemas móveis a estudar, proposto pela dissertação.

Os sistemas de armazenamento para dispositivos móveis distinguem-se dos anteriores no conjunto de características obrigatórias que devem possuir. Em geral, os sistemas mais adequados para estas aplicações são aqueles que possuem baixo peso, volume e auto-descarga. São também excluídos desde já as tecnologias de armazenamento exclusivamente estacionárias (CAES subterrâneo, bombagem, supercondutores magnéticos, baterias de fluxo, NaS e baterias de metal líquido), sendo apenas considerados os restantes.

O veículo elétrico (EV) é constituído por um motor exclusivamente elétrico e a sua propulsão é feita totalmente por motores elétricos. Assim, um dos maiores problemas com veículos deste tipo é a sua autonomia devido aos baixos valores de energia específica apresentados pelos sistemas de armazenamento disponíveis.

Para que o veículo elétrico se torne competitivo com os veículos híbridos ou convencionais, é necessário aumentar a sua energia e potência específica. Uma energia específica elevada confere ao veículo um sistema de armazenamento com maior capacidade de armazenamento, já a potência específica permite que o veículo recarregue mais rapidamente [70]. Além disto, veículos deste tipo que estão totalmente dependentes da energia elétrica armazenada requerem uma muito baixa auto-descarga e uma elevada eficiência. Dentro das tecnologias consideradas, apenas as baterias de lítio são consideradas adequadas com a sua elevada eficiência, baixa auto-descarga e mais elevada energia específica dentro dos sistemas considerados. Estas são também as baterias com maiores valores de densidade de energia e volume em simultâneo, conferindo adicionalmente um volume mais pequeno de armazenamento ao veículo.

Destacam-se os veículos Chevrolet Spark EV, Ford Focus electric, e Kia Soul EV como alguns exemplos de veículos elétricos.

Os veículos híbridos e *plug-in* (HEV e PHEV, respetivamente) foram desenvolvidos com o objetivo de superar as limitações e desvantagens do veículo elétrico e convencional (ICE), respetivamente. No veículo híbrido existe a combinação entre um motor de combustão interna e um motor elétrico que permite reduzir o esforço do motor de combustão, com a finalidade de reduzir o consumo de combustíveis fósseis e as emissões de gases poluentes [70, 75]. A diferença entre veículos *plug-in* e híbridos é sobretudo o método de recarga da bateria: o HEV reutiliza a energia cinética do veículo para o carregamento da bateria já o PHEV é ligado e carregado através de energia elétrica exterior (rede). Assim, estes dois tipos de veículos necessitam de baterias em especial com uma potência específica elevada. A energia específica depende do grau de

hibridização do veículo híbrido escolhido (micro-híbrido, médio-híbrido ou híbrido completo). Considera-se que sistemas CAES à superfície, volantes de inércia, baterias de chumbo-ácido, íão de lítio, de NiCd são opções a considerar neste tipo de veículos. Destacam-se os veículos Citroën C3 híbrido, Honda Insight e Toyota Prius como modelos de veículos híbridos atualmente disponíveis [75]. Assim como o veículo da Peugeot Citroen com armazenamento de ar comprimido apresentado na Figura 3-5.



Figura 3-5: Interior do veículo a ar comprimido [76].

No entanto, as tecnologias de armazenamento móveis não são apenas utilizados no setor dos transportes, mas também importantes para equipamentos eletrônicos de pequenas dimensões.

Os equipamentos eletrônicos de pequenas dimensões requerem simultaneamente uma elevada densidade de energia/potência (que confere um volume mais baixo), uma elevada energia/potência específica (que confere um peso mais baixo) e uma baixa auto-descarga (que confere maior autonomia¹⁶). No entanto, estes valores são bastante mais restritos que para os veículos. Aqui, as tecnologias AEE escolhidas necessitam de um tamanho e peso baixo o suficiente que ofereça ao utilizador a liberdade de o transportar e manipular para todo o lado.

Com o avanço tecnológico e com o aumento da complexidade dos equipamentos eletrônicos portáteis utilizados diariamente (telemóveis, *tablets*, computadores portáteis etc.) tem-se tornado difícil encontrar baterias que possam cumprir os requisitos, cada vez mais exigentes, destes equipamentos. A mais lenta evolução dos sistemas de armazenamento causa um risco de estagnação no desenvolvimento de novas tecnologias de informação e comunicação [77]. Os volantes de inércia, CAES superfície, supercondensadores, baterias de fluxo e de metal líquido não serão analisados por não serem considerados sistemas portáteis.

Atualmente, para que o sistema de armazenamento seja adequado e não condicione a liberdade do dispositivo, necessita de ter uma auto-descarga muito baixa de aproximadamente 0.2% por dia, no máximo [77]. Assim, as baterias NiCd não são consideradas competitivas por este fator. Os restantes sistemas possuem uma auto-descarga muito baixa que se encaixa dentro dos limites impostos.

Analisa-se finalmente os valores de densidade de energia/potência e energia/potência específica¹⁷ (Figura 3-6 e Figura 3-7 respetivamente): quanto mais altos forem estes valores, mais

¹⁶ A autonomia não depende apenas da auto-descarga da tecnologia AEE mas também da eficiência do dispositivo e das diversas medidas que possui para mais eficientemente utilizar a energia provida pela tecnologia AEE utilizada.

¹⁷ É importante o estudo simultâneo da energia e potência do dispositivo. Um valor alto de densidade de energia em simultâneo com energia específica confere ao equipamento eletrónico maior capacidade de armazenamento por unidade de massa/volume. Um valor elevado de densidade de potência em simultâneo com potência específica confere ao dispositivo a capacidade de carregar mais depressa e libertar uma quantidade de energia maior num mais curto espaço de tempo. Quanto maior forem os valores destes quatro parâmetros melhor será o desempenho do dispositivo.

baixo é o volume e peso do sistema de AEE, respetivamente [2]. É possível observar que os sistemas mais pequenos e leves são as células de combustível e as baterias de ião de lítio.

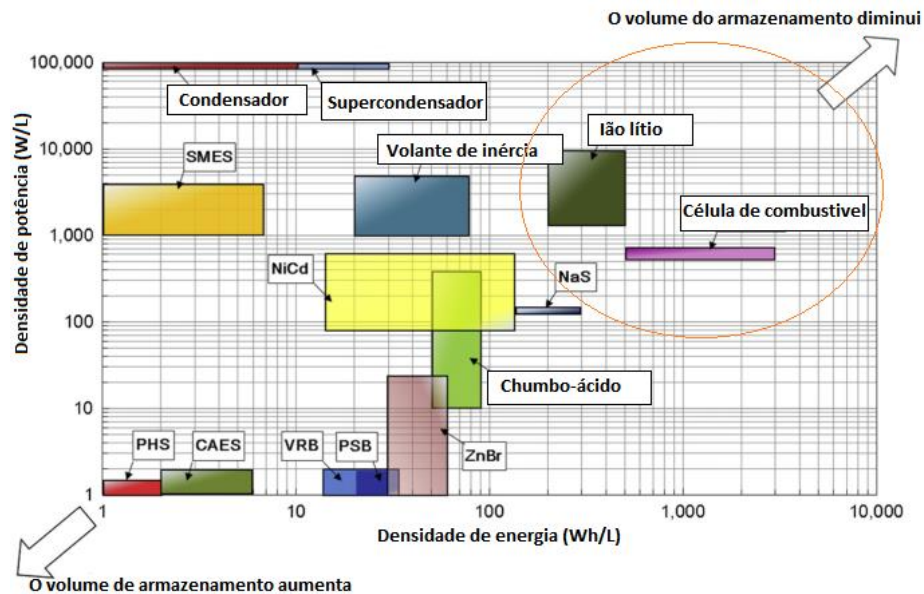


Figura 3-6: Comparação da densidade de potência e energia para as diferentes tecnologias [2].

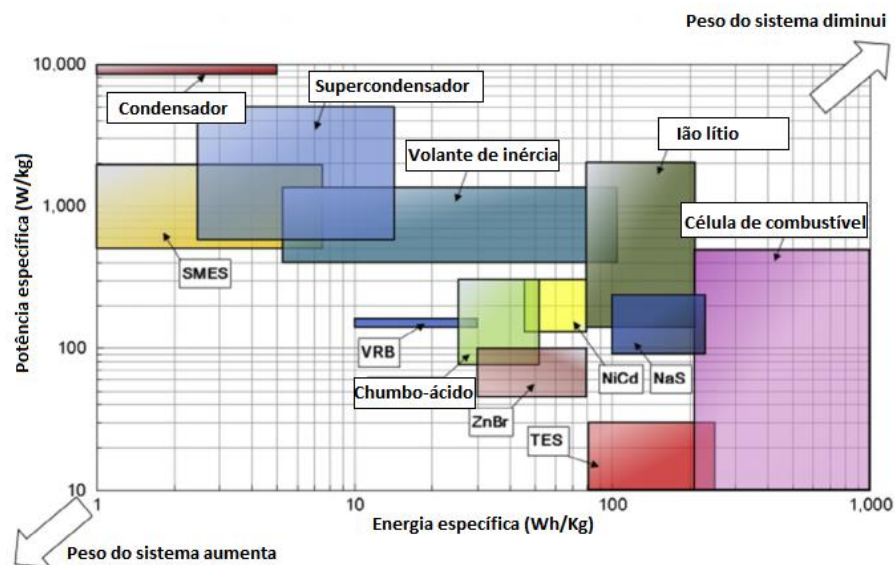


Figura 3-7: Comparação da potência e da energia específica das diferentes tecnologias [2].

3.4 Conclusões preliminares

Durante este capítulo estudaram-se as tecnologias de armazenamento mais indicadas para os diferentes campos de aplicação.

Os sistemas AEE de apoio à rede foram separados em dois grandes grupos: a gestão de energia (por sua vez dividida em grande e média/pequena escala) e a qualidade de energia. No que toca a gestão de energia, esta foi separada em grande e pequena/média escala de acordo com os requisitos de potência. Conclui-se que as tecnologias mais indicadas para a grande escala são a bombagem, CAES subterrâneo, e determinadas baterias eletroquímicas (VRB e LMB). Para gestão de energia de pequena/média escala, as opções são mais variadas devido às mais baixas necessidades de capacidade de potência. Assim, sistemas de CAES superfície e diversas baterias eletroquímicas são adequados a este campo. Para o controlo de qualidade de energia os supercondensadores, volantes de inércia, supercondutores magnéticos e algumas baterias eletroquímicas são considerados indicados, em especial as VRB.

Estudou-se ainda os sistemas mais indicados para a integração de renováveis para dois campos distintos: utilização de renováveis em locais remotos (*off-grid*) e para suavização de intermitência (*on-grid*). Conclui-se que, para locais *off-grid* com elevada produção eólica, os sistemas mais indicados são, sem dúvida, a bombagem e o CAES subterrâneo devido às suas características técnicas e ao facto de serem tecnologias com um elevado valor ESOI. Adicionalmente, conclui-se que as baterias de metal líquido são ótimas candidatas neste campo de aplicação devido ao seu elevado número de ciclos que consequentemente aumenta o seu valor ESOI. Caso o local possua elevada produção de energia solar, concluiu-se que os sistemas de armazenamento mais adequados são a bombagem, CAES subterrâneo, células de combustível e as *diversas* baterias eletroquímicas. Quanto a sistemas de armazenamento para suavização de intermitência concluiu-se que as baterias de metal líquido são mais adequadas para locais com elevada penetração de energia eólica e que, para elevada penetração de energia solar, o armazenamento pode ser feito em diversas baterias eletroquímicas, excluindo baterias NiCd.

Quanto a sistemas AEE para aplicações móveis, estes requerem características diferentes, em especial em termos de restrições de peso e volume. Conclui-se que, atualmente, as baterias ião de lítio constituem o sistema AEE mais adequado aos veículos elétricos, sendo também uma opção indicada, em termos técnicos para veículos híbridos e *plug-in* e ainda para equipamentos eletrónicos de pequenas dimensões. Para os veículos híbridos e *plug-in*, existem ainda outras tecnologias que, em termos técnicos, são consideradas adequadas, tais como baterias NiCd, chumbo-ácido, volante de inércia e CAES superfície. No entanto, a escolha do sistema mais adequado está dependente do grau de hibridização do veículo: quanto maior for o grau de hibridização, maior terá de ser o valor de densidade de energia/potência e energia/potência específica da tecnologia escolhida.

Para os equipamentos eletrónicos de pequenas dimensões é importante considerar valores muito mais baixos de peso e volume. Aqui, para além das baterias de ião de lítio, concluiu-se que as células de combustível são também potencialmente indicadas. No entanto, em termos técnicos esta tecnologia não pode ainda competir com as baterias de ião de lítio por possuir uma eficiência muito baixa.

Em geral, é de concluir que, dentro de todos os sistemas de armazenamento referidos para os diferentes campos de aplicação, sem dúvida as baterias VRB, metal líquido e ião de lítio demonstram-se promissoras em diferentes áreas, o que as torna mais indicadas para investimentos e desenvolvimento tendo em conta as suas características técnicas. No entanto, quando se fala em investimentos, as características técnicas são apenas um lado da questão. Existem tecnologias que possuem mais potencial para evolução que outras. Este potencial está dependente de características

económicas e da possibilidade de ultrapassar os desafios que estas tecnologias enfrentam. É nestes pontos que o próximo capítulo se foca, para que seja possível entender quais as tecnologias com maior possibilidade de evolução no futuro.

4 Potencial para evolução e sucesso tecnológico

Este capítulo tem por objetivo analisar as tecnologias de AEE mais promissoras. A primeira secção deste capítulo pretende apresentar os indicadores propostos para o estudo da evolução tecnológica, que se determinam o sucesso de tecnologias de AEE desenvolvidos no decorrer deste trabalho: competitividade, escalabilidade, replicabilidade e versatilidade. Na segunda secção é feita uma análise integrada destes indicadores para as diferentes tecnologias através de dois cenários distintos: um cenário em que cada indicador possui o mesmo peso e um segundo cenário em que determinados indicadores possuem um peso mais elevado que outros (cenário realista). Seguidamente, após a escolha das tecnologias com maior potencial para evolução, é feito um levantamento das dificuldades que essas tecnologias enfrentam no seu desenvolvimento. Finalmente, a quarta e última secção apresenta as conclusões deste capítulo.

4.1 Proposta de indicadores de potencial para evolução tecnológica

O principal foco desta dissertação é desenvolver parâmetros que ajudem a determinar o potencial de sucesso e evolução de uma tecnologia de AEE. Para que tal seja possível, é necessário entender o que torna, atualmente, uma tecnologia mais bem-sucedida que as outras. Uma das tecnologias mais utilizadas e bem-sucedidas nos dias de hoje é, sem dúvida, a bombagem. Isto deve-se especialmente à sua elevada capacidade de armazenamento e ao seu baixo custo. No entanto, estes sistemas não podem ser utilizados em qualquer lado e em qualquer momento, sendo necessárias condições geográficas e meteorológicas específicas. Além disso, é uma tecnologia unicamente estacionária. Assim, existe a necessidade de investir cada vez mais em tecnologias que possam competir com a bombagem em termos de custo e capacidade de armazenamento e, em simultâneo, que possam ser instaladas em diferentes locais e utilizadas em diferentes aplicações.

Estes quatro fatores são considerados por esta dissertação como sendo os principais indicadores de potencial para evolução, sendo apresentados no esquema da Figura 4-1.

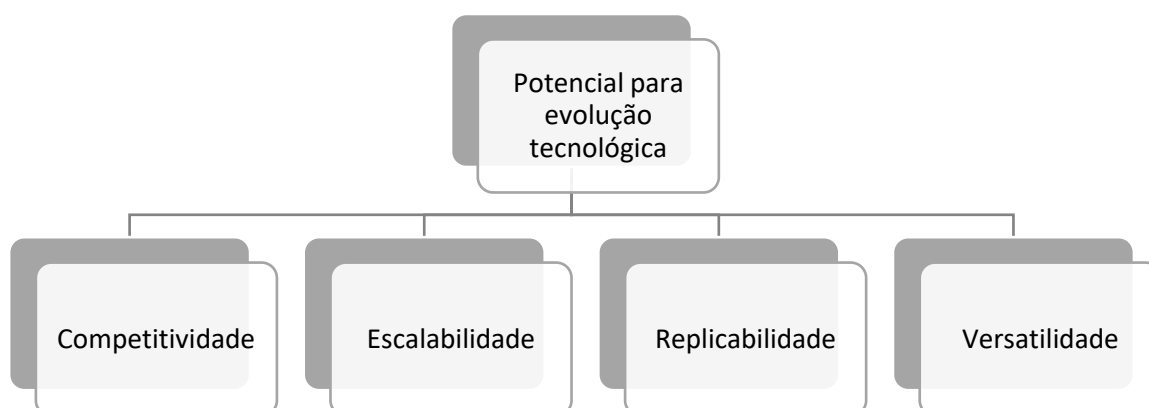


Figura 4-1: Indicadores de sucesso tecnológico a explorar, propostos por esta dissertação.

4.1.1 Competitividade

A competitividade diz respeito à possibilidade de redução do custo da tecnologia considerando o seu nível de desenvolvimento e a possibilidade de avanços e descobertas tecnológicas na área. Aqui será estudada, portanto, a relação entre o custo nivelado de eletricidade e o nível de desenvolvimento tecnológico.

A bombagem é ainda um dos meios mais atrativos de armazenar energia. O sucesso deste meio deve-se ao conjunto de características técnicas que possui para além das restantes características já estudadas anteriormente. Adicionalmente, o seu custo nivelado de eletricidade (€/kWh/ciclo) é muito reduzido quando comparado com outras tecnologias, ainda que o custo de investimento (€/kWh) seja relativamente alto. Porém, o custo de investimento ou nivelado de eletricidade não devem ser utilizados como meio de comparação entre tecnologias sem que seja primeiro estudado o grau de desenvolvimento da tecnologia em causa. Este parâmetro designa-se de potencial de redução de custos.

Para a avaliação do potencial de redução de custo é primeiro importante avaliar o nível de desenvolvimento da tecnologia em causa. Diferentes níveis de desenvolvimento possuem uma probabilidade diferente de redução de custo: quanto mais elevado for o nível de desenvolvimento tecnológico, mais reduzida e difícil é a alteração do seu custo. Este facto é especialmente evidente nos gráficos da Figura 4-2 e Figura 4-3 onde se pode constatar duas tendências: a primeira é a da descida do custo da tecnologia ao longo do tempo com os avanços no seu desenvolvimento, a segunda é que à medida que a tecnologia se desenvolve é cada vez mais difícil baixar o seu custo. Estas duas tendências serão utilizadas para o estudo do potencial de redução de custos. Para que tal seja possível, é necessário diferenciar primeiro os níveis de desenvolvimento de cada tecnologia.

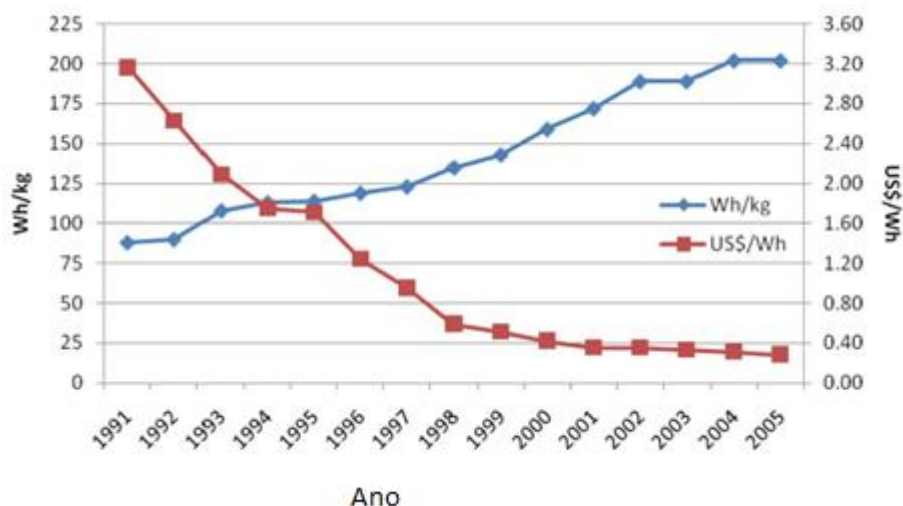


Figura 4-2: O aumento da energia específica da bateria de ião de lítio e a descida do seu custo com o passar dos anos (análise entre 1991 e 2005). Adaptado de [78].

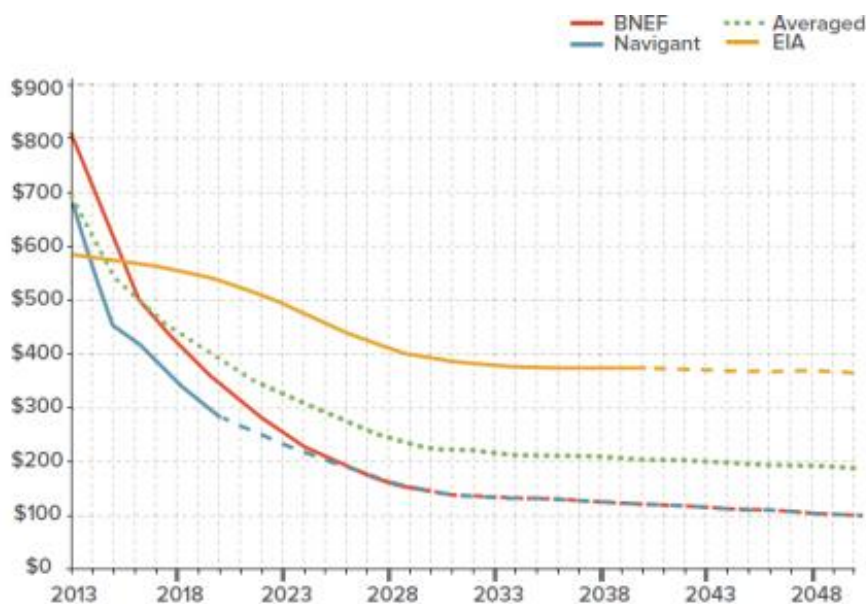


Figura 4-3: Projeções das descidas dos preços das baterias eletroquímicas por diferentes companhias[79]. A tracejado estão representadas as expectativas de redução.

A proposta para a classificação do nível de desenvolvimento encontra-se descrita na Tabela 4-1. Esta proposta é baseada nos já existentes TRL (*Technology Readiness level*) [80] mas compactado e adaptado aos sistemas AEE.

Tabela 4-1: Proposta da classificação do nível de desenvolvimento, baseada nos TRL.

Nível	Descrição
5	<u>Madura.</u> Tecnologia completa e sem espaço para melhorias significativas;
4	<u>Desenvolvida e disponível.</u> Últimos acertos do verdadeiro desenvolvimento do sistema. Permite melhorar o produto para além da programação final;
3	<u>Em desenvolvimento.</u> Fase de desenvolvimento depois de aprovadas as demonstrações para ficarem comercialmente disponíveis;
2	<u>Demonstração.</u> Avaliação de protótipos; fases de ensaios no ambiente definido para a sua utilização;
1	<u>Investigação.</u> É o começo do desenvolvimento da tecnologia; inclui investigação básica da ciência, características teóricas da tecnologia e especulação das aplicações.

Fonte: adaptado de [80].

De entre os diversos tipos de custo, escolheu-se utilizar o custo nivelado de eletricidade atual da tecnologia, medido em €/MWh/ciclo, pois permite comparar sistemas dotados de características diferentes (eficiência, número de ciclos e custo de investimento), sendo utilizado em diversos estudos, permitindo uma comparação justa entre tecnologias de armazenamento de escalas diferentes [81]. O cálculo deste custo está indicado na expressão (4-1):

$$\text{Custo (€/MWh/ciclo)} = \text{custo investimento (€/MWh)} \times \frac{1}{\eta \times \lambda} \quad (4-1)$$

Onde η é a eficiência e λ é o número de ciclos do sistema.

O custo de operação e manutenção (O&M) não foi considerado durante a análise bidimensional do potencial de redução de custos, mas é tido em conta da mesma forma na avaliação das tecnologias com maior potencial de redução de custo.

Assim, tendo em conta o custo e o nível de desenvolvimento será considerado que:

- Quanto mais baixo for o nível de desenvolvimento da tecnologia mais elevada será a probabilidade de redução de custo;
- Tecnologias com alto nível de desenvolvimento necessitam de ter custos muito reduzidos para se tornarem viáveis e competitivas no mercado;
- O custo operacional tal como o custo de investimento ou nivelado possui a mesma tendência de redução, sendo mais difícil a sua redução para níveis de desenvolvimento mais altos.

O nível de desenvolvimento e os custos para a análise bidimensional deste parâmetro encontram-se descritos na Tabela 4-2.

É de realçar que o custo de armazenamento de energia tendo em conta o seu nível de desenvolvimento não constitui por si só uma ferramenta válida para a determinação do sucesso de uma tecnologia quer seja de armazenamento ou não. No entanto, é considerada nesta dissertação, como um dos pilares da determinação do sucesso.

Tabela 4-2: Custos e nível de desenvolvimento das tecnologias de armazenamento de energia a estudar

Tecnologias	Custo de investimento (€/kWh)	Custos O&M (€/kW/ano)	Custo nivelado de eletricidade (€/kWh/ciclo)	Nível de desenvolvimento
Bombagem	4-90	~2.6	<0.001	5
CAES subterrâneo	2-110	17-22	0.004	4
CAES superfície	180-220	Muito baixo	0.036	3
Volante de inércia	1000-5000	~18	0.09	4
Supercondensador	300-2000	~5	0.09	3
SMES	1000-10000	~17	0.89	3
Célula H ₂	>10000	0.0017-0.015 ¹⁸	0.17	2
Chumbo-ácido	180-360	45	0.13	4
Ião de lítio	535-2230;	-	0.15	4
Metal líquido	~45-250	-	~0.002	2
NaS	270-450	~71	0.09	4
NiCd	710-1340	~18	0.45	4
Fluxo	130-800	~62	0.06	2

¹⁸ O custo O&M das células de combustível é variável a cada ano e não pode ser quantificado em €/kW/ano como os restantes [103]. O custo O&M das células de combustível está dependente da necessidade de remodelar a célula de combustível que acrescenta um custo adicional de 20 a 40% da totalidade do sistema em causa a cada 5 anos (aproximadamente). É assumido que este custo adicional está dependente da quantidade de energia produzida e não das horas de operação. Assim, são considerados custos variáveis dependendo do ano em questão [104].

Nota: - não aplicável ou sem informação. Fonte: [2 – 4, 60].

Com estes dados foi possível elaborar o gráfico da

Figura 4-4. Este gráfico dá a indicação do custo e do nível de desenvolvimento de cada tecnologia considerada, onde são representadas as tecnologias estudadas, com exceção da bateria de NiCd e da tecnologia SMES, cujos valores de custo são elevados e, por questões de visualização, não serão apresentados.

Tecnologias que possuam elevado nível de desenvolvimento (nível 4 ou 5) só são competitivas se já possuíram um custo bastante baixo. Por exemplo, por observação do gráfico é possível verificar que as baterias de chumbo-ácido, assim como as baterias de NiCd encontram-se com um custo muito elevado para o seu nível de desenvolvimento. Isto faz com que a redução do seu custo para valores competitivos seja muito difícil. No entanto a avaliação destas tecnologias faz mais sentido se forem considerados os diferentes tipos de aplicações.

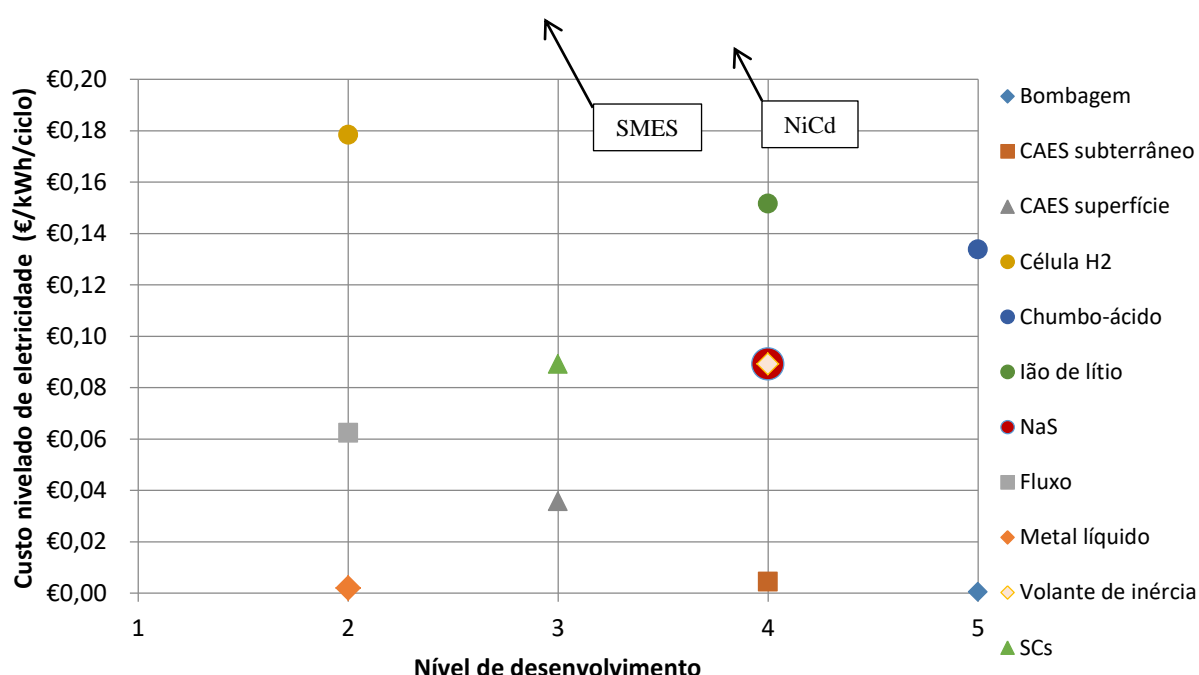


Figura 4-4: Comparação do nível de desenvolvimento tecnológico e custo nivelado. Para efeitos de uma visualização mais detalhada retiraram-se as baterias NiCd e sistemas SMES devido ao custo muito elevado quando comparadas com as restantes tecnologias.

Dentro das tecnologias escolhidas para a gestão de energia, as que possuem maior potencial para redução de custo são as baterias de metal líquido pois apresentam um custo muito reduzido (e competitivo) e as baterias de fluxo que possuem um preço mais alto mas um grande potencial de redução. Porém, é de considerar que as baterias de fluxo possuem um custo de operação e manutenção ainda muito elevado quando comparado às restantes soluções. No entanto, o seu nível de desenvolvimento, ainda baixo, possibilita esta descida, tornando-se uma das melhores opções de armazenamento eletroquímico ao lado das baterias de metal líquido cujo custo de O&M é ainda desconhecido. As células de combustível possuem ainda um preço relativamente elevado mas, novamente, a probabilidade da sua descida é elevada. As tecnologias de CAES superfície são ainda competitivas pelas mesmas razões. Quanto às restantes tecnologias, prevê-se que os preços se mantenham relativamente constantes ao longo do tempo com uma descida mínima para as baterias

NaS, chumbo-ácido e ião de lítio e que se mantenha constante para os sistemas CAES subterrâneo e bombagem. Entre estas três baterias eletroquímicas prevê-se que as baterias de lítio se tornem mais competitivas que as restantes devido a não terem custos de operação e manutenção. Não se prevê que, num futuro muito próximo, alguma tecnologia eletroquímica possa ser competitiva com os sistemas de CAES subterrâneo e bombagem.

Para aplicações de controlo de qualidade de energia prevê-se que os supercondensadores sejam os mais competitivos por terem a relação custo/desenvolvimento mais favorável. Os sistemas SMES possuem o mesmo nível de desenvolvimento que os últimos, no entanto consideram-se sistemas com uma tendência a ter um custo sempre muito elevado. Os volantes de inércia possuem um custo neste momento competitivo com os supercondensadores, mas com o passar do tempo é provável que os supercondensadores tenham um custo mais baixo. Dentro dos custos O&M destes dois últimos sistemas, os supercondensadores possuem um valor mais baixo.

Para aplicações de integração de renováveis prevê-se que as baterias de metal líquido se tornem bem-sucedidas a nível económico, e até competitivas com a bombagem e o CAES subterrâneo, devido à grande possibilidade de descida do seu custo, tendo em conta o seu desenvolvimento. Dentro das restantes baterias eletroquímicas prevê-se que as baterias de ião de lítio sejam as mais bem-sucedidas e com mais oportunidade de competição nível de custo.

Dentro de baterias para aplicações móveis, prevê-se que atualmente as células de combustível não são de todo competitivas com as restantes soluções mas que a possível queda do custo possa tornar-se uma melhor opção. Dentro das baterias eletroquímicas selecionadas para este propósito, entende-se que ambas possuem um nível de desenvolvimento que não permite uma grande redução de custo. No entanto, é de salientar que as baterias de chumbo-ácido possuem um custo O&M muito elevado. Assim, entende-se que, devido às baterias de ião de lítio não possuírem custo O&M e à maior probabilidade da descida do custo, estes sistemas são não só competitivos como superiores.

Com estes resultados, foi possível elaborar o índice de competitividade que servirá mais tarde para a análise integrada de todos os fatores determinantes em conjunto. O índice de competitividade reflete a probabilidade de redução de custo da tecnologia assim como a competitividade desta em relação ao que se encontra disponível no mercado a baixo custo. Assim, tecnologias como a bombagem e CAES subterrâneo possuem um elevado índice de competitividade por serem tecnologias muito exploradas e com um custo muito atrativo. Entende-se que, para que uma tecnologia seja competitiva no futuro, esta terá de atingir um custo muito baixo semelhante ao custo da bombagem ou CAES subterrâneo no caso de aplicações estacionárias. Porém, isto só é verdade para tecnologias estacionárias em que a bombagem e o CAES subterrâneo são opções a considerar. Em aplicações móveis, em que estas tecnologias não podem ser inseridas, as baterias de ião de lítio, células de combustível e baterias de fluxo possuem os valores mais competitivos [1]. Embora as baterias de fluxo ainda não sejam indicadas a aplicações móveis, prevê-se que, caso exista o desenvolvimento de baterias deste tipo com valores mais elevados de densidade de energia e potência por unidade de massa e volume, estas baterias se tornem muito competitivas com as atuais opções.

A Tabela 4-3 apresenta os resultados finais do estudo da competitividade. Quanto mais alto for o valor, mais alta é a probabilidade dessa tecnologia se tornar competitiva no mercado de armazenamento quando atingir níveis de desenvolvimento mais altos.

Tabela 4-3: Índice relativo de competitividade de acordo com a proposta da dissertação.

Tecnologias	Índice de competitividade
Bombagem	5
CAES subterrâneo	5
CAES superfície	4
Volante de inércia	2
Supercondensador	3
SMES	2
Célula H2	3
Chumbo-ácido	1
Metal líquido	5
lão de lítio	2
NaS	2
NiCd	1
Fluxo	4

4.1.2 Escalabilidade

Outra característica que promove o sucesso de uma tecnologia é a escalabilidade. Esta característica é já muito conhecida em especial nas aplicações informáticas e tem um papel importante para o sucesso da tecnologia, pois possibilitam a instalação de sistemas AEE maiores ou menores dependendo das necessidades locais exatas. A escalabilidade é a capacidade de adicionar mais ou menos unidades de armazenamento ao sistema de AEE na sua totalidade, sem que isso afete o desempenho do sistema [82]. É medida em especial recorrendo aos valores de capacidade de potência e energia máximos e mínimos que estão disponíveis e construídos atualmente.

Este indicador é muito utilizado nas telecomunicações e engenharia *software* e é uma característica desejada em todo o sistema, podendo ser adaptado ao armazenamento de energia como sendo a facilidade que o sistema tem em armazenar quantidades maiores (ou menores) de energia quando necessário através do acréscimo (ou decréscimo) de novas unidades de armazenamento ou substituição das unidades atuais por unidades maiores fisicamente ou com características superiores [83], [84]. Considera-se que os valores máximos e mínimos que existem atualmente para a capacidade de potência e energia de sistemas de AEE já levam em consideração o desempenho para o sistema e que o desempenho deste sistema é afetado caso os valores de armazenamento não se encontrem nos limites mencionados.

A área final fornece o valor de escalabilidade, que é a área de energia e potência cobrida pelo sistema. A equação utilizada para determinar este parâmetro está presente na expressão (4-2):

$$Escalabilidade = (Pot_{max} - Pot_{min})\eta \times (E_{max} - E_{min})DoD \quad (4-2)$$

Onde Pot_{max} e Pot_{min} correspondem aos valores de potência máxima e mínima respetivamente, η é a eficiência do sistema, E_{max} e E_{min} são os valores de capacidade de energia

máxima e mínima e finalmente o DoD corresponde à profundidade de descarga para cada uma das tecnologias.

Os resultados estão apresentados na Tabela 4-4. Sendo a capacidade de energia a energia máxima que pode ser retirada ao sistema sem que isto afete o seu desempenho, este deve ser multiplicado pela profundidade de descarga máxima sendo esta a quantidade de energia máxima que pode ser retirada. Por sua vez, a potência máxima e mínima do sistema está dependente da eficiência [3]. Para que um sistema de armazenamento seja competitivo, necessita de ter uma elevada eficiência pois é este parâmetro que confere ao sistema uma boa transmissão de energia ao longo do tempo, por consequência, uma boa potência [3].

Tabela 4-4: Capacidades máximas e mínimas de potência e energia dos sistemas selecionados.

Tecnologias	Capacidade potência (MW)		η (%)	Capacidade de energia (MWh)		DoD (%)	Valor de escalabilidade
	Min.	Max.		Min.	Max.		
Bombagem	100.00	5000.00	85	500.00	800.00	100	1249500.00
CAES subterrâneo	110.00	290.00	70	580.00	2860.00	100	287280.00
CAES superfície	0.003	3.00	-	0.01	0.01	100	0.03
Volante de inércia	0.100	20.00	95	-	5.00	100	94.53
Supercondensador	-	0.300	97	-	0.01	100	0.00
SMES	0.100	100.00	98	0.015	1000.00	-	97900.53
Célula H ₂	10.00	40.00	50	0.312	39.00	100	580.32
Chumbo-ácido	1.00	40.00	80	0.001	40.00	80	998.38
Metal líquido	0.10	5000.00	97	0.20	150.00	100	726515.47
Ião de lítio	16.00	16.00	75	0.004	20.00	80	593.76
NaS	5.00	30.00	90	0.40	245.00	80	5806.94
NiCd	0.00	40.00	83	6.75	6.75	40	89.64
Fluxo	2.00	100.00	85	6.00	120.00	100	9496.20

Nota: características sem informação estão apresentadas com um -. Fonte: [2], [4], [42], [60], [85]

Para que seja possível uma análise integrada de todos os fatores determinantes de sucesso apresentados, é necessário converter estes valores para pontuações entre 1 e 5. Para este efeito, elaborou-se um índice de escalabilidade relativa, apresentado na Tabela 4-5 de acordo com os resultados obtidos anteriormente e, posteriormente, a classificação final de cada tecnologia, apresentada na Tabela 4-6.

Tabela 4-5: Proposta de classificação de escalabilidade relativa.

Nível	Descrição
5	Escalabilidade muito alta. O valor de área é superior a 500000.
4	Escalabilidade alta. O valor de área está compreendido entre 499999 e 50000.
3	Escalabilidade média. O valor de área está compreendido entre 49999 e 5000.

2	Escalabilidade baixa. O valor de área está compreendido entre 4999 e 500.
1	Escalabilidade muito baixa. O valor de área está abaixo de 500.

Nota: os valores em escala MW e MWh.

Tabela 4-6: Índice relativo de escalabilidade de acordo com a proposta da dissertação.

Tecnologias	Índice de escalabilidade
Bombagem	5
CAES subterrâneo	4
CAES superfície	1
Volante de inércia	1
Supercondensador	1
SMES	4
Célula H ₂	2
Chumbo-ácido	2
Metal líquido	5
Íon de lítio	2
NaS	3
NiCd	1
Fluxo	3

Os sistemas com maiores valores de potência e energia em simultâneo são a bombagem, CAES subterrâneo, SMES e metal líquido. As baterias de metal líquido possuem o maior intervalo em valores de potência desde 0,1MW até 5000MW tendo ainda um limite de capacidade de acumulação de energia relativamente alto com valores entre os 0,2MWh e os 150MWh.

Dentro dos restantes sistemas, destacam-se as baterias de fluxo e NaS. As baterias de fluxo possuem o segundo mais elevado índice de escalabilidade dentro das baterias; embora o seu limite de potência seja baixo em relação às baterias de metal líquido, é bastante elevado quando comparada às outras baterias. Além disto, este sistema possui uma muito satisfatória capacidade de acumulação que pode variar entre 6 e 120MWh e encontram-se em fases muito iniciais de desenvolvimento e é possível que estes limites se venham a alargar. O último sistema interessante a estudar nesta característica é a bateria NaS. Esta bateria possui uma muito boa capacidade de armazenamento que pode variar entre 0,4 e 245 MWh. No entanto, devido à sua baixa capacidade de potência quando comparada às restantes soluções é provável que comece a ser substituída por soluções mais apelativas.

4.1.3 Replicabilidade

Embora a bombagem seja um dos métodos mais famosos de AEE, este possui determinadas características negativas que afetam a sua utilização e que levaram ao desenvolvimento de outras tecnologias: a necessidade de locais com condições geográficas muito específicas e a dependência que o potencial de armazenamento tem das condições climáticas. Este é também um dos fatores

propostos a utilizar para determinar o sucesso tecnológico uma vez que foi algo que impulsionou o desenvolvimento de novas tecnologias de armazenamento que pudessem ultrapassar estes problemas. Este fator designa-se por replicabilidade.

A replicabilidade, definida como sendo a capacidade que existe em reproduzir na totalidade um sistema, sem que exista alteração das suas características operacionais [86], torna-se assim indicador importante do sistema uma vez que a construção de sistemas idênticos em locais diferentes diminui a variabilidade das características do sistema (no espaço e no tempo) e o nível de estudos a fazer sobre o local de construção. Assim, é sempre preferível um sistema com um nível de replicabilidade elevado. Aqui é avaliada a dependência geográfica e meteorológica do local em que se insere a tecnologia; para alguns sistemas o meio onde se inserem constitui a impressão digital da tecnologia, sendo cada instalação única. Por outras palavras, esta característica refere-se essencialmente à necessidade de adaptar o meio ambiente ao sistema de armazenamento. Assim, quanto mais condições forem necessárias exigir ao meio para suportar o sistema, menor será replicabilidade do sistema.

No geral, a dependência das características geográficas do local é mais penalizada pelo facto de alterar todas as características do sistema. A dependência das condições meteorológicas afeta o sistema apenas a nível temporal e não espacial, podendo assim variar apenas algumas características, em especial a capacidade de armazenamento e a auto-descarga, a nível horário, diário ou sazonal. A Tabela 4-7 constitui uma proposta simplificada para a classificação geral desta dependência, onde são consideradas as seguintes dependências:

- Dependência de local de construção específico;
- Dependência da temperatura;
- Dependência da pluviosidade.

Tabela 4-7: Matriz de classificação da replicabilidade, proposta pela dissertação.

			Dependência meteorológica		
			Não	Sim	
			0	1	2
Dependência geográfica	Não	0	5	4	3
	Sim	1	3	2	1

Posteriormente foi possível elaborar um descritivo desta classificação, apresentada na tabela Tabela 4-8.

Tabela 4-8: Definição de níveis de classificação da replicabilidade, de acordo com a matriz apresentada.

Nível	Descrição
5	Muito alta replicabilidade. A tecnologia não possui dependência quer das condições geográficas quer das condições meteorológicas
4	Alta replicabilidade. A tecnologia possui dependência de <u>apenas uma</u> das seguintes condições meteorológicas: - Pluviosidade; - Temperatura.
3	Média replicabilidade. Verifica-se uma das seguintes condições: - Necessidade de condições geográficas específicas para a construção da tecnologia; - Dependência das condições meteorológicas.
2	Baixa replicabilidade. As características operacionais da tecnologia dependem das condições geográficas do local de construção e de <u>uma</u> das seguintes dependências meteorológicas: - Pluviosidade; - Temperatura.
1	Muito baixa replicabilidade. As características operacionais da tecnologia dependem das condições geográficas do local de construção e de <u>ambas</u> as seguintes dependências meteorológicas: -Pluviosidade; -Temperatura.

De acordo com a proposta da dissertação para a classificação dos sistemas quanto à sua replicabilidade foi então elaborada a Tabela 4-9 com estas classificações para que fosse possível distinguir as tecnologias melhor índice de replicabilidade das piores de acordo com o método utilizado.

Tabela 4-9: Replicabilidade das tecnologias consideradas de acordo com a proposta da dissertação.

Tecnologias	Índice de replicabilidade
Bombagem	1
CAES subterrâneo	3
CAES superfície	5
Volante de inércia	4
Supercondensador	5
SMES	4
Célula H2	4
Chumbo-ácido	5
Metal líquido	4
Ião de lítio	5
NaS	4

NiCd	5
Fluxo	4

Como esperado, é possível verificar que a bombagem e o CAES subterrâneo possuem o mais baixo nível de replicabilidade por serem muito dependentes das condições geográficas do local em que são construídos. Todos os restantes sistemas são distinguidos de acordo com a dependência da temperatura (condições meteorológicas).

Dentro de baterias eletroquímicas, destacam-se as baterias NiCd cuja temperatura pode variar entre -20°C e 65°C, de chumbo-ácido com uma variação entre -20°C e 50°C e as baterias de ião de lítio que variam entre -20°C e 60°C [87]. As baterias de fluxo possuem uma pontuação mais baixa pela sua variação estar entre 15°C e 50°C [4], [88]. As baterias de metal líquido, NaS e os sistemas SMES devem a sua pontuação devido às altas temperaturas que atingem. Baterias de metal líquido e NaS não devem ser instaladas em locais de baixa temperatura pois isto torna mais difícil manter a temperatura de operação. Pelo contrário, os sistemas SMES necessitam de equipamento de refrigeração pelo que a sua instalação em locais muito quentes não é adequada. Os supercondensadores devem a sua alta classificação por puderem atingir temperaturas na ordem dos 200°C sem que isso afete o seu desempenho.

Os sistemas de volante de inércia por norma só conseguem operar a temperaturas inferiores a 40°C [89] e, portanto, não devem ser instalados em locais muito quentes do mundo, não sendo portanto comparáveis com as baterias eletroquímicas mencionadas. Nas células de combustível depende do tipo de célula escolhido, pois existem células de combustível para várias temperaturas. No entanto devido à existência de várias subcategorias de células de combustível, considera-se que este sistema no geral, não é dependente da temperatura. Os sistemas de CAES quer sejam subterrâneos ou à superfície necessitam de aquecer/arrefecer o ar mediante o estado de armazenamento/libertação de ar. Considera-se assim que o armazenamento de ar comprimido em tanques na superfície pode ser afetado pela temperatura exterior em condições de elevadas ou muito baixas temperaturas pelas trocas de calor que existem entre o tanque e o exterior. No entanto, devido ao estado de desenvolvimento desta tecnologia (ainda em desenvolvimento) estas questões de trocas de calor são ainda pouco estudadas.

4.1.4 Versatilidade

Outro fator limitante do sucesso da bombagem é o facto de ser um método de armazenamento unicamente estacionário de grande escala. Esta limitação é especialmente imposta pelo custo de investimento e pela área física que necessita, que posteriormente impossibilita a propagação desta tecnologia em outras áreas. Ao contrário, o encaixe das baterias de ião de lítio em diversas áreas possibilitou o seu crescente desenvolvimento e inovação por investigadores diferentes de campos de aplicação diferentes que se focaram em melhorar determinadas características específicas destas baterias para o campo de aplicação em questão. Este é outro dos parâmetros propostos a considerar neste capítulo que determinam o sucesso da tecnologia que se designa versatilidade tecnológica.

A importância da versatilidade está ligada à inovação tecnológica. Quanto maior for a versatilidade de uma tecnologia, mais empresas, investigadores, produtores e utilizadores estarão ligados a essa tecnologia [90]. Isto aumenta não só a probabilidade de inovação da tecnologia e o melhoramento de diferentes características em simultâneo: por exemplo empresas interessadas na

no uso da tecnologia em transportes estarão focadas na redução do custo ou aumento da energia específica da tecnologia, ao passo que investigadores interessados na utilização da mesma tecnologia para aplicações estacionárias estarão focadas na melhoria de características como a capacidade de armazenamento ou o tempo de descarga da tecnologia. Assim, tecnologias que se consigam inserir em diversos campos de aplicação possuem uma maior probabilidade de sucesso no mercado por serem mais propícias a investimentos para diferentes campos de aplicação no que toca a recursos, materiais e técnicas de produção que aceleram o seu desenvolvimento.

Para que seja possível estudar este parâmetro, a proposta desta dissertação é avaliar a versatilidade numa escala de 1 a 5 tendo em conta os campos de aplicação em que estas se inserem. A matriz apresentada na Tabela 4-10 permite a visualização da proposta de avaliação:

Tabela 4-10: Matriz de classificação da versatilidade, proposta pela dissertação.

		Aplicações móveis			
		0	1	2	3
Aplicações estacionárias	0	0	1	2	2
	1	1	2	3	3
	2	1	3	4	4
	3	1	3	5	5
	4	2	4	5	5
	5	3	4	5	5
	6	3	4	5	5
	7	3	5	5	5

Posteriormente foi elaborado um descritivo baseado nesta matriz de classificação, que possui a descrição geral de cada nível de classificação (ver Tabela 4-11).

Tabela 4-11: Definição de níveis de classificação da versatilidade, de acordo com a matriz apresentada

Nível	Descrição
5	Muito alta versatilidade. Verifica-se uma das seguintes condições: - Tecnologia adequada a 1 campo móvel e pelo menos 7 campos estacionários; - Tecnologia adequada a 2 ou mais campos móveis e pelo menos 3 campos estacionários;
4	Alta versatilidade. Verifica-se uma das seguintes condições: - Tecnologia adequada a 1 campo móvel e 4 a 6 campos estacionários; - Tecnologia adequada a pelo menos 2 campos móveis e apenas 2 campos estacionários;
3	Média versatilidade. Verifica-se uma das seguintes condições: - Tecnologia não adequada a campos móveis mas

	adequada a pelo menos 5 campos estacionários; - Tecnologia adequada a um campo móvel e 2 ou 3 campos estacionários; - Tecnologia adequada a 2 ou mais campos móveis mas apenas a 1 campo estacionário.
2	Baixa versatilidade. Verifica-se uma das seguintes condições: - Tecnologia adequada apenas a 1 campo móvel e 1 campo estacionário; - Tecnologia adequada apenas a 4 campos estacionários; - Tecnologia adequada a pelo menos 2 campos móveis mas nenhum campo estacionário.
1	Muito baixa versatilidade. Verifica-se uma das seguintes condições: - Tecnologia apenas adequada a 1 campo móvel e nenhum campo estacionário; - Tecnologia apenas adequada, no máximo, a 3 campos estacionários e nenhum campo móvel.

Tendo em conta os resultados obtidos no capítulo anterior, foi possível elaborar a classificação final do nível de versatilidade das tecnologias de armazenamento estudadas no decorrer desta dissertação que estão apresentados na Tabela 4-12. Destacam-se as células de combustível e baterias de íão de lítio com o mais elevado índice de versatilidade, e a bombagem, CAES, SMES e supercondensadores com o mais baixo índice de acordo com as definições dadas a cada nível e os campos de aplicação estudados.

Tabela 4-12: Classificação final da versatilidade de acordo com a proposta da dissertação.

Tecnologias	Índice de versatilidade
Bombagem	1
CAES subterrâneo	1
CAES superfície	3
Volante de inércia	3
Supercondensador	1
SMES	1
Célula H ₂	5
Chumbo-ácido	3
Metal líquido	4
Íão de lítio	5
NaS	2
NiCd	2
Fluxo	4

4.2 Análise integrada de resultados

De acordo com os indicadores de potencial apresentados anteriormente, elaborou-se a Tabela 4-13 de síntese, com a informação mais importante a reter:

Tabela 4-13: Síntese da informação dos indicadores de potencial tecnológico, utilizados no decorrer da dissertação.

Indicador	Descrição	Tecnologias favorecidas	Exemplos
Competitividade	Tecnologias que possuam uma relação entre custo atual e nível de desenvolvimento que seja favorável	Tecnologias com ambos custo e nível de desenvolvimento baixo	Baterias de metal líquido e fluxo
		Tecnologias com custo elevado, mas baixo nível de desenvolvimento	Célula H2
		Tecnologias com custo baixo mas nível de desenvolvimento elevado	Bombagem, CAES subterrâneo
Escalabilidade	Alcance das capacidades de armazenamento de energia e potência	Tecnologias que consigam alcançar em simultâneo valores muito altos e muito baixos de capacidade de energia e potência	Bombagem, baterias de metal líquido
Replicabilidade	Capacidade de replicar as mesmas características de armazenamento em locais diferentes com condições meteorológicas diferentes	Tecnologias cujas características operacionais não se alterem mediante o local em que são construídas	CAES superfície, supercondensador, baterias de ião de lítio
Versatilidade	Capacidade de adaptar a tecnologia a diversos campos de aplicação	Tecnologias que são adequadas a diferentes aplicações móveis e estacionárias em simultâneo	Baterias de ião de lítio, células H2

É necessário entender que num cenário realista nem todos os parâmetros possuem o mesmo peso α . Dependendo do avanço tecnológico, determinados parâmetros podem tornar-se mais importantes que outros. Por exemplo, num cenário em que é possível desenvolver tecnologias a baixo custo, o peso do parâmetro de competitividade é mais baixo que os restantes. Assim, serão apresentados três cenários. Primeiramente será analisado um cenário base em que todos os indicadores possuem o mesmo peso – cenário base. Posteriormente será referido um cenário considerado nesta dissertação mais próximo do real, em que a competitividade e a escalabilidade são parâmetros com um peso superior aos restantes.

O índice de potencial para evolução tecnológica, P_{ET} , é calculado através da expressão (4-3):

$$P_{ET} = \alpha_c \cdot C + \alpha_e E + \alpha_r R + \alpha_v V \quad (4-3)$$

Onde α_c , α_e , α_r e α_v , representam os valores do peso atribuído a cada um dos parâmetros competitividade C, escalabilidade E, replicabilidade R e versatilidade V respetivamente.

4.2.1 Análise de cenário base

O cenário base é considerado como aquele em que todos os parâmetros possuem o mesmo peso no resultado final, sendo indicado pelo gráfico da Figura 4-5. No entanto, este cenário não deve ser considerado como realista, pois tecnologias como a bombagem – que possuem um baixo índice de replicabilidade e versatilidade – são bastante utilizadas atualmente devido ao seu elevado valor de

escalabilidade e competitividade. Porém, este cenário constitui a base do estudo sendo adicionalmente importante para entender o impacto que tem a alteração dos pesos de cada indicador em outros cenários.

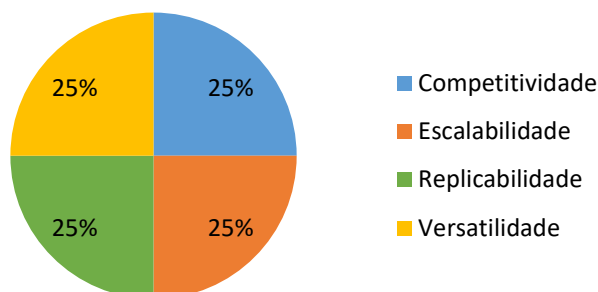


Figura 4-5: Peso dos diferentes indicadores num cenário base.

De acordo com o peso dado a cada indicador neste primeiro cenário, foi possível elaborar o gráfico da Figura 4-6, onde é apresentado o resultado final de cada tecnologia.

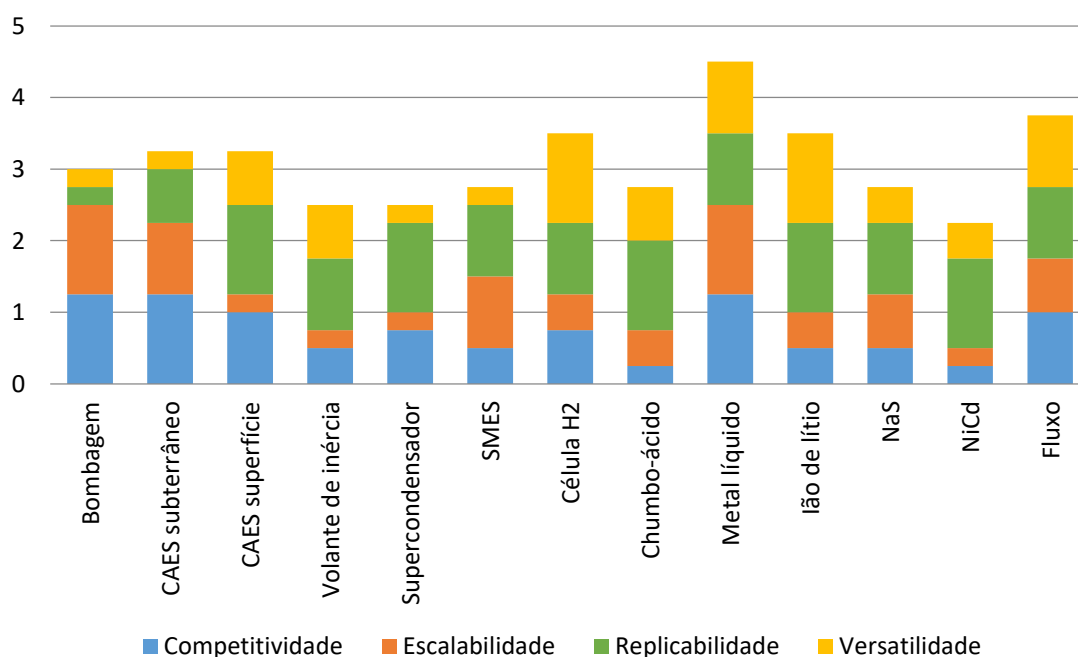


Figura 4-6: Índice de potencial para evolução tecnológica das tecnologias estudadas, num cenário base.

Por observação do gráfico da Figura 4-6 entende-se que, ambas as tecnologias de bombagem e CAES subterrâneo possuem elevados índices de competitividade e escalabilidade. Porém, os seus baixos valores de replicabilidade e escalabilidade tornam o seu potencial para evolução tecnológica relativamente baixo quando comparado a outras tecnologias. Além disso, não existe possibilidade de aumentar os seus valores de competitividade e escalabilidade, isto porque o valor de custo

nivelado de eletricidade é já muito baixo e o seu nível de desenvolvimento bastante alto. Assim sendo, prevê-se uma estagnação do seu potencial para evolução pois não existe qualquer possibilidade de aumentar o seu nível de versatilidade (apenas possível caso se consiga obter um tempo de resposta mais baixo ou a sua utilização em campos de aplicação móvel) ou de aumentar o seu índice de replicabilidade pois estes sistemas estarão sempre dependentes do local de construção. Tais desvantagens devem ser exploradas por parte de outros sistemas, em especial baterias de metal líquido e fluxo que, para além de possuírem já elevada competitividade e escalabilidade, possuem adicionalmente alto índice de replicabilidade e versatilidade. Para estas baterias eletroquímicas é ainda importante mencionar que existe elevada probabilidade que o seu índice geral venha a aumentar. No caso das baterias de metal líquido, é possível que, a descoberta de novos materiais para as paredes das células venha a reduzir as perdas de calor, isto é a sua auto-descarga e, consequentemente, a sua dependência da temperatura, tornando esta bateria mais viável em ambientes frios, o que aumentaria posteriormente a sua replicabilidade. O mesmo pode acontecer no caso das baterias de fluxo, cujo índice de replicabilidade é relativamente baixo, pela sua dependência de temperatura. Para esta bateria, existe ainda a possibilidade adicional de aumentar o seu índice de versatilidade com a sua utilização no setor do transporte. Para que tal seja possível é necessário aumentar a sua densidade de energia por unidade de massa e volume. Além disso, caso seja possível reduzir o seu valor de intensidade energética ϵ , passará a ser uma opção viável para o armazenamento de energia eólica, tornando-a uma solução de armazenamento muito promissora.

O elevado potencial para evolução das baterias de ião de lítio deve-se especialmente à sua elevada versatilidade, sendo possível a sua utilização em vários campos de aplicação. No entanto, devido ao seu nível de desenvolvimento, existe baixa probabilidade que este índice de versatilidade venha a aumentar, pois para que tal seja possível, a bateria de ião de lítio teria de reduzir os seus valores de intensidade energética, para que fosse viável o armazenamento de energia eólica. Em geral, só é possível aumentar o índice total do potencial para evolução tecnológica caso seja possível aumentar o seu índice de competitividade – através da descida do seu custo – ou através do aumento da sua escalabilidade – através do aumento dos seus limites de capacidade. No entanto tendo em conta o seu desenvolvimento, prevê-se que a melhoria da sua escalabilidade seja uma opção mais razoável a considerar. Quanto às células de combustível é necessário melhorar os valores de competitividade versatilidade e escalabilidade para que seja possível aumentar o seu índice geral de potencial para evolução. Existe grande probabilidade de melhoria do seu valor de competitividade pois estas tecnologias encontram-se ainda em níveis baixos de desenvolvimento, o que indica uma elevada probabilidade da redução do seu custo, quer seja pelo desenvolvimento de novos materiais ou métodos de produção, ou pelo aumento da sua eficiência que, por conseguinte aumentará também o seu índice de versatilidade, pois torna esta tecnologia mais adequada ao setor dos transportes e, a sua escalabilidade, pois aumenta a capacidade de energia que é armazenada e libertada.

Os volantes de inércia e as baterias de NiCd possuem um perfil semelhante. Em ambos existe elevada replicabilidade, sendo esta replicabilidade dificilmente melhorada. Para os volantes de inércia, a melhoria deste indicador traduz-se num melhoramento dos materiais de construção para que seja possível a sua utilização a temperaturas superiores a 40°C. A bateria NiCd possui um intervalo de temperaturas de operação bastante interessante, entre -20°C e 60°C sendo já possível a sua utilização em ambientes muito frios e muito quentes sem problemas na sua operação. Porém estes sistemas encontram-se limitados em especial pela sua escalabilidade e competitividade. O melhoramento da replicabilidade do volante de inércia, através de novos materiais, pode ter como consequência uma diminuição da sua competitividade pois poderá implicar um aumento do custo

da tecnologia. Para além disto, o volante de inércia já se encontra num estado de desenvolvimento com menor probabilidade de redução de custo – o que dificulta ainda mais a melhoria deste indicador. De igual modo NiCd, a probabilidade da redução do seu custo é muito baixa, por se encontrar num nível de desenvolvimento avançado e o seu custo ser ainda muito alto.

Os supercondensadores possuem um índice de potencial relativamente baixo devido especialmente aos baixos valores de versatilidade e escalabilidade. Porém, os supercondensadores possuem uma função secundária: a sua utilização em baterias eletroquímicas e células de combustível (sistemas híbridos) permite aumentar as características das baterias como tempo de vida, eficiência etc., tornando a bateria mais adequada a outros campos de aplicação. Portanto, embora nesta proposta de classificação os supercondensadores possuam baixo potencial de evolução, prevê-se que a sua utilização seja mais concentrada com a crescente utilização de baterias híbridas e células de combustível, principalmente no setor dos transportes, causando por consequência, um aumento da sua versatilidade para valores muito mais altos. Já em termos de escalabilidade, prevê-se que seja dificilmente melhorada, por questões de segurança, já mencionadas anteriormente.

As baterias de chumbo-ácido possuem ainda um baixo índice de competitividade, que se deve especialmente ao seu elevado custo para o nível de desenvolvimento em que se encontra. Assim, o método mais viável para a redução do custo desta tecnologia é através da melhoria do número de ciclos e eficiência, que pode ser feito com a posterior evolução da bateria ALAB, considerada uma bateria híbrida. A melhoria destas duas características técnicas possibilitaria a utilização destas baterias em outros campos de aplicação estacionários, melhorando assim o seu índice de versatilidade e escalabilidade.

A tecnologia de SMES possui diversos problemas. Esta tecnologia possui um índice de escalabilidade bastante elevado quando comparado a grande parte das tecnologias apresentadas. No entanto, o seu custo afeta o seu índice de competitividade: ainda que seja possível a descida do seu custo, prevê-se que esta redução nunca seja suficiente para que a tecnologia seja viável em termos económicos. Além disso, o seu baixo valor de versatilidade dificulta ainda mais a sua evolução, pois existem tecnologias disponíveis com valores de replicabilidade, escalabilidade e competitividade significativamente mais altos que podem ser utilizados num maior número de campos de aplicação.

Finalmente, o CAES à superfície é um método de armazenamento ainda muito recente. No entanto existe a necessidade de aumentar o seu índice de escalabilidade e versatilidade. Ainda assim, considera-se que esta tecnologia possui um elevado potencial para desenvolvimento especialmente considerando que pode ser utilizada tanto em aplicações estacionárias como em aplicações móveis. Porém, são necessários mais estudos sobre as características operacionais deste sistema para que seja possível obter um resultado mais crítico.

Quanto às baterias de NaS possuem problemas de versatilidade devido ao seu baixo número de ciclos e ao seu modo de operação: as altas temperaturas de operação não permitem a utilização deste sistema em aplicações móveis, tal como acontece com as baterias de metal líquido. No entanto, estas baterias possuem um número de ciclos bastante elevado que permite um índice de escalabilidade e competitividade muito superior e que se reflete num índice geral de potencial para evolução muito maior. No caso das baterias de NaS, o seu baixo número de ciclos afeta a sua competitividade e versatilidade. Tal como sucede com as baterias de metal líquido e os volantes de inércia, a melhoria dos materiais que compõe as baterias NaS pode causar um aumento da sua replicabilidade, permitindo a sua construção em locais mais frios sem que tal afete as suas

características operacionais. No entanto, tal aumento pode trazer consequências aos seus valores de competitividade.

4.2.2 Proposta de cenário alternativo

É designado nesta dissertação por cenário realista aquele que aponta para a urgência em desenvolver sistemas de armazenamento que sejam competitivos com a tecnologia de bombagem a nível de custo e de escalabilidade. Assim, num cenário que é considerado por esta dissertação como atual, pelo atual estado das tecnologias de armazenamento de energia, em que efetivamente já se desenvolveram tecnologias com elevados índices de replicabilidade e versatilidade (baterias eletroquímicas), mas ainda não foi possível o seu desenvolvimento a baixo custo e com elevados valores de capacidade de potência e energia. Assim, ao passo que no passado existia a preocupação do desenvolvimento de tecnologias com elevada replicabilidade e versatilidade – o que levou ao desenvolvimento de diversas baterias eletroquímicas – atualmente considera-se que o foco principal é o desenvolvimento de tecnologias que possuam estes mesmos elevados índices de replicabilidade e versatilidade, mas que consigam competir com a bombagem e o CAES a nível de custo. Desta forma, considera-se que no cenário referido como passado, se atribuía um peso superior a ambos os parâmetros de replicabilidade e versatilidade. Porém, com o passar do tempo e o desenvolvimento de novas tecnologias de armazenamento, o foco passou a ser precisamente a escalabilidade e a competitividade tecnológica destas tecnologias, obrigando a que, num cenário futuro mais realista se dê destaque a estes dois parâmetros. Assim, nesta proposta de cenário alternativo (ver Figura 4-7), atribui-se um peso superior à escalabilidade e à competitividade (40% cada). Escolhe-se o valor de 40% por permitir salientar melhor os resultados obtidos. Considera-se que um valor muito acima dos 40% iria ocultar os restantes parâmetros de replicabilidade e versatilidade.

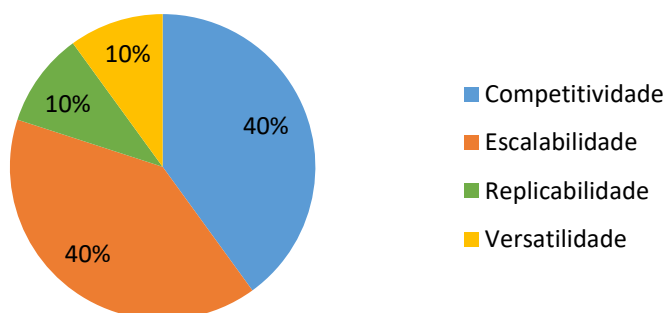


Figura 4-7: Peso dos diferentes indicadores num cenário alternativo considerado por esta dissertação como mais realista.

De acordo com esta distribuição de pesos, foi possível refazer a análise das tecnologias de armazenamento, de forma a obter o gráfico presente na Figura 4-8.

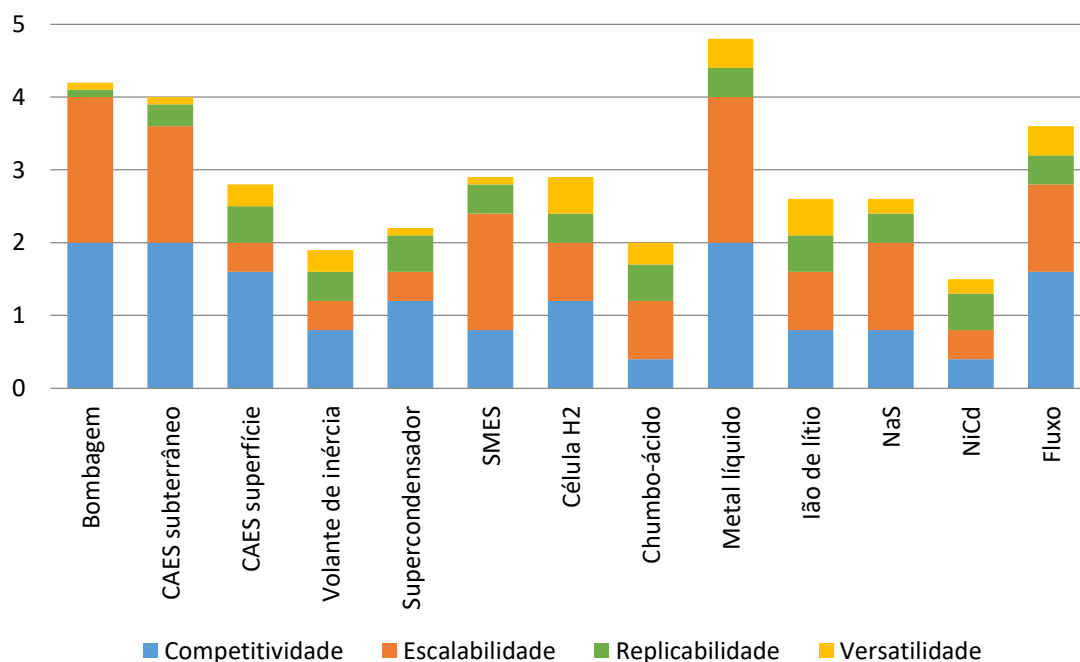


Figura 4-8: Índice de potencial para evolução tecnológica das tecnologias estudadas, no cenário realista, de acordo com a proposta da dissertação.

O aumento do peso do indicador de escalabilidade e competitividade produziu um cenário final diferente do analisado anteriormente. Aqui, apesar das baterias de metal líquido e fluxo continuarem a destacar-se das restantes baterias eletroquímicas, o mesmo não acontece para as baterias de ião de lítio e células de combustível que, agora, possuem índices de potencial para evolução mais baixos e comparáveis aos da bateria NaS e tecnologia SMES, respetivamente, que ganham um índice geral mais alto devido à mais elevada escalabilidade.

Neste novo cenário é também possível observar que, pelo facto de possuírem elevado índice de competitividade, os sistemas CAES à superfície passam a ter um índice geral de evolução mais alto. No entanto, o peso de 40% associado à escalabilidade mantém o seu índice geral muito baixo. Além disto, neste cenário, existe a possibilidade desta tecnologia se vir a tornar competitiva com as baterias de fluxo devido ao seu baixo custo.

Ainda assim, tal como acontece com a análise feita anteriormente, também neste cenário, as baterias de metal líquido e fluxo são consideradas como os sistemas de armazenamento com maior potencial para evolução tecnológica e serão alvo para mais I&D, constituindo assim uma melhor solução de armazenamento.

4.3 Conclusões preliminares

Este capítulo teve como objetivo entender quais as tecnologias com mais potencial para evolução tecnológica, onde se começou por propor os parâmetros que possibilitam a determinação deste potencial. De forma a definir estes parâmetros foi necessário avaliar a trajetória de tecnologias com elevado sucesso no passado e presente, e os problemas que estas tecnologias enfrentam no futuro. A tecnologia escolhida para este propósito foi a bombagem, onde se concluiu

que o seu reduzido custo e a sua grande capacidade de armazenamento são as características que lhe conferem o seu elevado potencial. No entanto a utilização deste método de armazenamento tem desvantagens que devem ser ultrapassadas por outras tecnologias. A bombagem não pode ser utilizada em locais que não reúnam as condições geográficas e meteorológicas adequadas. Além disto, este sistema é apenas aplicável a um pequeno número de campos de aplicação, dificultando assim o seu avanço. Assim, com estas características em mente, foram desenvolvidos quatro indicadores: competitividade, escalabilidade, a replicabilidade e versatilidade.

A competitividade diz respeito à possibilidade de redução do custo da tecnologia considerando o seu nível de desenvolvimento e a possibilidade de avanços e descobertas tecnológicas na área. São tecnologias com elevado índice de competitividade, aquelas que possuem um custo baixo ou alto, mas ainda níveis de desenvolvimento baixos (em I&D de protótipo) ou tecnologias já em estados avançados de desenvolvimento (comerciáveis e maduras) com baixo custo. Destaca-se em especial a bombagem, CAES subterrâneo e as baterias de metal líquido.

Seguidamente estudou-se o índice de escalabilidade, que diz respeito à capacidade de armazenamento do sistema. A escalabilidade foi calculada recorrendo à capacidade potência e energia: quanto maior for a amplitude de armazenamento do sistema, maior será a escalabilidade. Destacam-se as baterias de metal líquido, bombagem, o CAES subterrâneo e os supercondutores magnéticos (SMES) com os maiores índices de escalabilidade.

Posteriormente, analisaram-se as tecnologias de acordo com o seu índice de replicabilidade, onde se atribuiu uma maior pontuação às tecnologias com menor dependência das condições geográficas e meteorológicas do local onde são construídas, sendo as baterias eletroquímicas diferenciadas pelas restrições de temperatura de operação. Concluiu-se aqui que os sistemas com melhor replicabilidade são o CAES à superfície, os supercondensadores e as baterias de ião lítio, chumbo-ácido e níquel-cádmio.

Finalmente, estudou-se a versatilidade. Considera-se que a versatilidade, isto é, a adaptação da tecnologia de armazenamento aos diferentes campos de aplicação, é um parâmetro importante pois o número de aplicações diferentes de uma tecnologia é diretamente proporcional ao número de investigadores e empresas que se encontram dedicados ao melhoramento das características técnico-económicas da tecnologia em causa. As tecnologias com melhor índice de versatilidade são as células de combustível e as baterias de ião de lítio.

Consequentemente, foi possível realizar uma análise integrada dos resultados num cenário base, em que todos os indicadores possuem um peso igual e, posteriormente foi proposto um cenário diferente, considerado mais realista, onde foram atribuídos pesos diferentes. Neste cenário, aos indicadores de competitividade e escalabilidade é atribuído um peso superior, pela necessidade de procurar tecnologias que possam ser competitivas nestes indicadores com a atual bombagem.

Em qualquer um dos casos chegou-se à conclusão que ambas as baterias de metal líquido e de fluxo possuíam os índices mais altos de potencial para evolução tecnológica. Estas tecnologias, para além de resolverem grande parte dos problemas da bombagem e CAES subterrâneo (baixa replicabilidade e versatilidade), possuem adicionalmente índices de competitividade e escalabilidade suficientemente altos para se tornarem uma boa opção no futuro, para locais em que não seja possível a construção destes sistemas de armazenamento mecânicos.

5 Conclusões

Este capítulo resume o trabalho elaborado nesta dissertação. Primeiramente são apresentadas as conclusões a que esta dissertação permitiu chegar. Seguidamente são referidos possíveis trabalhos futuros a desenvolver no contexto desta dissertação.

5.1 Síntese do estudo

Vive-se numa época onde a procura de energia irá continuar a aumentar substancialmente tendo em conta a crescente população mundial, assim como a necessidade de mais energia por parte dos dispositivos utilizados. Ao mesmo tempo, a acentuada vontade e necessidade de diminuir a utilização de combustíveis fósseis, aumentar a contribuição de energia produzida por fontes renováveis de forma a evitar uma crise energética e ambiental, e ainda o desenvolvimento de veículos mais independentes de combustíveis fósseis tem impulsionado o desenvolvimento de novas tecnologias de armazenamento.

O objetivo desta dissertação foi explorar as diferenças e as aplicações das tecnologias de armazenamento desenvolvidas, assim como avaliar o seu potencial para evolução tecnológica.

No decorrer deste trabalho, verificou-se que, atualmente, a bombagem é a tecnologia de armazenamento estacionário mais viável a nível técnico-económico, devido ao seu baixo custo, alta eficiência, elevada capacidade de armazenamento, etc. No entanto, as limitações desta tecnologia, em especial a sua dependência de condições geográficas e meteorológicas específicas, obrigam à procura de novas tecnologias competitivas em termos técnico-económicos e que, em simultâneo, ultrapassem estas limitações. Para aplicações móveis, não sendo possível a utilização de bombagem, a bateria de íão de lítio é atualmente uma das melhores opções. Porém, o seu baixo índice de competitividade e escalabilidade traduz-se num baixo potencial de redução de um custo ainda considerado elevado e numa necessidade de aumentar a sua capacidade de armazenamento. Consequentemente, estes problemas obrigam a melhoria desta bateria ou procura de novas soluções de armazenamento que superem estes problemas.

Ainda assim, nem todas as tecnologias desenvolvidas possuem potencial para evolução tecnológica. Algumas destas tecnologias possuem limitações que dificilmente podem ser ultrapassadas. Em especial, as baterias eletroquímicas que, embora bastante diversas (quer em combinação de elétrodos, quer em componentes, modo de operação ou até em termos de aplicações), possuem ainda um custo demasiado elevado.

De entre as tecnologias consideradas, as baterias de metal líquido e de fluxo são as que possuem maior potencial para evolução tecnológica e, portanto, maior probabilidade de vir a competir com a bombagem em termos técnico-económicos para sistemas estacionários. Para sistemas móveis, existe a possibilidade de que as baterias de fluxo possam ultrapassar as baterias de íão de lítio em aplicações móveis, caso seja possível aumentar a sua densidade de energia por unidade de massa e volume. As células de combustível são uma outra opção a considerar. Possuem um índice de competitividade mais alto que as baterias de íão de lítio, e um índice de escalabilidade semelhante. Contudo, a escalabilidade desta tecnologia é ainda muito afetado pela sua baixa eficiência.

Prevê-se, adicionalmente, que o investimento em tecnologias como baterias de metal líquido e de fluxo promova a melhoria do índice de replicabilidade e versatilidade para a generalidade dos

campos de aplicação estacionários, impulsionando em especial a integração de energias renováveis *off-grid*. Além disto, o desenvolvimento de baterias de fluxo com valores mais elevados de energia específica faz com que seja possível o seu uso em aplicações no setor do transporte, tornando-as competitivas com as atuais baterias de íão de lítio e facilitando a vulgarização do veículo elétrico, tornando-o mais próximo da realidade.

5.2 Trabalho futuro

O trabalho desenvolvido na presente dissertação permitiu o desenvolvimento de indicadores que revelam a capacidade para evolução de cada tecnologia de armazenamento, com o intuito de comprovar que nem todas as tecnologias possuem a mesma capacidade para evolução, sendo desejável concentrar o investimento nas tecnologias de armazenamento com maior potencial de evolução. Contudo, no decorrer do desenvolvimento destes indicadores, existiram determinados fatores cujo estudo aprofundado poderá ser de interesse e oferecer uma análise mais detalhada sobre o potencial para evolução tecnológica:

- Desenvolvimento de indicador de impactos ambientais da tecnologia – estudo das atuais consequências ambientais que a fabricação, utilização e abandono da tecnologia no meio em que está inserido. Este indicador poderia ser avaliado de acordo com as emissões de CO₂/kWh ou até através da elaboração de uma tabela qualitativa com avaliações gerais de 1 a 5;
- Desenvolvimento de indicadores de tempo de construção – estudo do tempo de construção da tecnologia, através de uma análise do tempo necessário para construir e instalar as diferentes tecnologias com a mesma capacidade de armazenamento;
- Desenvolvimento de indicadores de segurança – avaliação do risco e magnitude de acidente, através da elaboração de uma matriz, semelhante à utilizada na versatilidade e na replicabilidade;
- Desenvolvimento de um indicador de disponibilidade de matérias-primas ou a utilização desta informação no enriquecimento do indicador de replicabilidade;
- Cálculo da intensidade energética das diferentes tecnologias AEE como possível indicador de potencial para evolução, onde tecnologias com baixa intensidade energética possuem maior potencial;
- Aplicação dos indicadores apresentados a outras tecnologias de armazenamento existentes, mencionadas no anexo A.2: Outras baterias eletroquímicas;
- Desenvolvimento de um método que permita encontrar o peso real de cada indicador estudado;
- Avaliação de diferentes cenários (com diferentes pesos) tendo em conta o campo de aplicação.

6 Referências Bibliográficas

- [1] C. J. Barnhart, M. Dale, A. R. Brandt, e S. M. Benson, «The energetic implications of curtailing versus storing solar- and wind-generated electricity», *Energy Environ. Sci.*, vol. 6, n. 10, pp. 2804–2810, 2013.
- [2] X. Luo, J. Wang, M. Dooner, e J. Clarke, «Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation», *Appl. Energy*, vol. 137, pp. 511–536, 2015.
- [3] H. Ibrahim, A. Ilinca, e J. Perron, «Energy Storage Systems - Characteristics and Comparisons», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2008.
- [4] P. Alotto, M. Guarnieri, e F. Moro, «Redox flow batteries for the storage of renewable energy: A review», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 2014.
- [5] D. McCullough, *Johnstown Flood*. Simon and Schuster, 2007.
- [6] C. D. Jackson e J. N. Hundley, «St . Francis Dam Disaster», *Calif. Hist.*, vol. 82, n. 3, 2004.
- [7] L. Mcdaniel, D. M. Ia, e J. Garton, «Lake Delhi Dam Breach – Two Perspectives», 2010.
- [8] «Brazil dam burst forces thousands from homes - BBC News». [Em linha]. Disponível em: <http://www.bbc.com/news/world-latin-america-16426732>. [Acedido: 05-Jan-2016].
- [9] T. Andersen, «Estudo de Impacte Ambiental do aproveitamento hidroelétrico do Fridão», *Dep. Ambient. e Ordenamento, Univ. Aveiro, Port.*, vol. I, II, III, 2001.
- [10] P. McCully, «Rivers no more: the environmental effects of dams.», em *Silenced rivers: the ecology and politics of large dams.*, P. McCully, Ed. 2001.
- [11] V. L. St. Louis, C. a. Kelly, É. Duchemin, J. W. M. Rudd, e D. M. Rosenberg, «Reservoir Surfaces as Sources of Greenhouse Gases to the Atmosphere: A Global Estimate», *Bioscience*, vol. 50, n. 9, p. 766, 2000.
- [12] T. Delsontro, D. F. McGinnis, S. Sobek, I. Ostrovsky, e B. Wehrli, «Extreme methane emissions from a swiss hydropower Reservoir: Contribution from bubbling sediments», *Environ. Sci. Technol.*, vol. 44, n. 7, pp. 2419–2425, 2010.
- [13] J. P. Deane, B. P. Ó Gallachóir, e E. J. McKeogh, «Techno-economic review of existing and new pumped hydro energy storage plant», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 14, n. 4, pp. 1293–1302, 2010.
- [14] Cobra SA e ProceSl Lda., «Programa Nacional de Barragens com Elevado Potencial Hidroelétrico (PNBEPH)», *Report. Inst. da Água, IP*, p. 170, 2007.
- [15] EDP, «Complementaridade hídrica-eólica». [Em linha]. Disponível em: http://www.a-nossa-energia.edp.pt/centros_produtores/complementariedade_hidroeolica_pe.php. [Acedido: 18-Nov-2016].
- [16] B. Roberts, «Capturing grid power», *IEEE Power Energy Mag.*, vol. 7, n. 4, pp. 32–41, 2009.
- [17] A. Cavallo, «Controllable and affordable utility-scale electricity from intermittent wind resources and compressed air energy storage (CAES)», *Energy*, vol. 32, n. 2, pp. 120–127, 2007.
- [18] D. Herman, «Comparison of Storage Technologies for Distributed Resource Applications», Palo Alto, 2003.
- [19] P. Denholm, «Improving the technical, environmental and social performance of wind

- energy systems using biomass-based energy storage», *Renew. Energy*, vol. 31, n. 9, pp. 1355–1370, 2006.
- [20] «Compressed Air Energy Storage (CAES) | Energy Storage Association». [Em linha]. Disponível em: <http://energystorage.org/compressed-air-energy-storage-caes>. [Acedido: 18-Mar-2016].
- [21] B. Cheung e R. Carriveau, «Storing Energy Underwater», *Mech. Eng.*, vol. 134, n. 12, 2012.
- [22] E. Power, «Advanced Compressed Air Energy Storage Demonstration», 2015.
- [23] U.S. Department of Energy, «Energy Storage Safety Strategic Plan», 2014.
- [24] B. Bolund, H. Bernhoff, e M. Leijon, «Flywheel energy and power storage systems», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 11, n. 2, pp. 235–258, 2007.
- [25] D. Castelvechi, «Spinning into control: High-tech reincarnations of an ancient way of storing energy», *Sci. News*, vol. 171, n. 20, pp. 312–313, 2007.
- [26] «Beacon Power - Environmental Benefits», 2014. .
- [27] S. Ashley, «Designing Safer Flywheels», vol. 118, pp. 1–6.
- [28] «Beacon Power - System Safety», 2014. [Em linha]. Disponível em: <http://beaconpower.com/system-safety/>. [Acedido: 26-Jun-2016].
- [29] J. M. Starbuck e J. G. R. Hansen, «Safety Assessment of PowerBeam Flywheel Technology», *Mater. Sci. Technol. Div.*, n. October, 2009.
- [30] «The Structure and Principle of Electrical Double Layer Capacitor», *Murata Manufacturing Co., Ltd.* [Em linha]. Disponível em: <http://www.murata.com/products/capacitor/edlc/techguide/principle>. [Acedido: 20-Out-2016].
- [31] M. Jayalakshmi e K. Balasubramanian, «Simple capacitors to supercapacitors - An overview», *International Journal of Electrochemical Science*, vol. 3, n. 11, pp. 1196–1217, 2008.
- [32] P. Barrade, «Series connection of supercapacitors: Comparative study of solutions for the active equalization of the voltages», *Networks*, pp. 1–6, 2002.
- [33] B. Dyatkin, V. Presser, M. Heon, M. R. Lukatskaya, M. Beidaghi, e Y. Gogotsi, «Development of a green supercapacitor composed entirely of environmentally friendly materials», *ChemSusChem*, vol. 6, n. 12, pp. 2269–2280, 2013.
- [34] G. Ren, G. Ma, e N. Cong, «Review of electrical energy storage system for vehicular applications», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 41, pp. 225–236, 2015.
- [35] «HYDROGEN PRODUCTION: ELECTROLYSIS», *U.S. Department of ENERGY*. [Em linha]. Disponível em: <http://energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-electrolysis>. [Acedido: 20-Jan-2016].
- [36] JobsInFuelCells, «Types of Fuel Cells», *Types of Fuel Cells*, 2014. [Em linha]. Disponível em: <http://www.jobsinfuelcells.com/fctypes.htm>. [Acedido: 12-Out-2016].
- [37] H. Tan, Xingguo Li, Qingmin Wang, «Advances and trends of energy storage technology in microgrid», *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 44, n. 1, pp. 179–191, 2013.
- [38] C. C. L. Moreira, «Identification and development of microgrids emergency control procedures», Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, 2008.
- [39] D. Linden e T. Reddy, *Handbook of Batteries*, 3ª edição. McGraw-Hill books.

- [40] R. M. Dell, *Understanding Batteries*, vol. 47. 2002.
- [41] Ecoult, «Public-Domain Test Data Showing Key Benefits and Applications of the UltraBattery®», n. January 2014, pp. 0–45, 2014.
- [42] H. Kim *et al.*, «Liquid Metal Batteries : Past , Present , and Future», *Chem. Rev.*, vol. 113, pp. 2075–2099, 2013.
- [43] B. Dunn, H. Kamath, e J.-M. Tarascon, «Electrical Energy Storage for the Grid: A Battery of Choices», *Science (80-.)*, vol. 334, n. 6058, pp. 928–935, 2011.
- [44] K. Higashimoto, H. Homma, Y. Uemura, H. Kawai, S. Saibara, e K. Hironaka, «Automotive lithium-ion batteries», *Hitachi Rev.*, vol. 60, n. 1, pp. 17–21, 2011.
- [45] «Huawei P8lite - Full phone specifications», 2015. [Em linha]. Disponível em: http://www.gsmarena.com/huawei_p8lite-7201.php. [Acedido: 22-Mar-2016].
- [46] D. Lisbona e T. Snee, «A review of hazards associated with primary lithium and lithium-ion batteries», *Process Saf. Environ. Prot.*, 2011.
- [47] A. Price, S. Bartlety, S. Male, e G. Cooley, «A novel approach to utility-scale energy storage», *Power Eng. J.*, vol. 13, n. 3, p. 122, 1999.
- [48] C. Lawrence, «The Benefits of Ice-Based Thermal Energy Storage», 2010. [Em linha]. Disponível em: <http://hpac.com/green/benefits-ice-based-thermal-energy-0510>. [Acedido: 16-Out-2016].
- [49] S. Succar e R. Williams, «Compressed Air Energy Storage : Theory, Resources, And Applications For Wind Power», Princeton University, 2008.
- [50] «Green Car Congress», *Compressed air vs Liquid air*, 2013. [Em linha]. Disponível em: <http://www.greencarcongress.com/2013/05/laen-20130509.html>.
- [51] IRENA e IEA-ETSAP, «Technology Brief - Electricity Storage», n. April, p. 28, 2012.
- [52] I. Hadjipaschalis, A. Poulikkas, e V. Efthimiou, «Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 13, n. 6–7, pp. 1513–1522, 2009.
- [53] F. Díaz-González, A. Sumper, O. Gomis-Bellmunt, e R. Villafáfila-Robles, «A review of energy storage technologies for wind power applications», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, n. 4, pp. 2154–2171, 2012.
- [54] «Beacon Power - Carbon Fiber Flywheels», *Carbon Fiber Flywheels*, 2014. .
- [55] M. Beaudin, H. Zareipour, A. Schellenberglobe, e W. Rosehart, «Energy storage for mitigating the variability of renewable electricity sources: An updated review», *Energy Sustain. Dev.*, vol. 14, n. 4, pp. 302–314, Dez. 2010.
- [56] J. McDowall, «Integrating energy storage with wind power in weak electricity grids», *J. Power Sources*, vol. 162, n. 2, pp. 959–964, 2006.
- [57] DTI, «Review of electrical energy storage technologies and systems and of their potential for the UK», 2004.
- [58] N. Kawakami, I. Yukihiisa, e M. Fukuhara, «Development and field experiences of stabilization system using 34MW NAS batteries for a 51MW wind farm.», em *Industrial Electronics (ISIE), 2010 IEEE International Symposium*, 2010, pp. 2371–2376.
- [59] R. Teodorescu, L. Barote, R. Weissbach, C. Marinescu, e M. Cirstea, «Stand-alone wind system with Vanadium Redox Battery energy storage», em *Proceedings of the 11th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment 2008*,

- 2008, pp. 407–412.
- [60] H. Chen, T. N. Cong, W. Yang, C. Tan, Y. Li, e Y. Ding, «Progress in electrical energy storage system: a critical review», vol. 19, n. 3, pp. 291–312, 2009.
- [61] J. S. Martins, C. Couto, e J. L. Afonso, «Qualidade de energia eléctrica», *3º Congr. Luso-Moçambicano Eng. – CLME'2003 Eng. e Inovação para o Desenvolv.*, pp. 219–231, 2003.
- [62] IEC, «Electrical Energy Storage White Paper», 2009.
- [63] J. Rutqvist, H. M. Kim, D. W. Ryu, J. H. Synn, e W. K. Song, «Modeling of coupled thermodynamic and geomechanical performance of underground compressed air energy storage in lined rock caverns», *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 52, pp. 71–81, 2012.
- [64] P. Leung, X. Li, C. P. de León, L. Berlouis, C. T. J. Low, e F. C. Walsh, «Progress in redox flow batteries, remaining challenges and their applications in energy storage», *RSC Adv.*, vol. 2, n. 27, pp. 10125–10156, 2012.
- [65] «DOE Global Energy Storage Database», *Nickel-Cadmium Battery Technology - World Projects*, 2016. .
- [66] «DOE Global Energy Storage Database - Smarter Network Storage», 2016. [Em linha]. Disponível em: <http://www.energystorageexchange.org/projects/411>. [Acedido: 17-Out-2016].
- [67] J. F. D. Trindade, «Projecto de um sistema energético sustentável para a Ilha do Corvo Engenharia Mecânica», Universidade Técnica de Lisboa, 2011.
- [68] M. A. Pellow, C. J. M. Emmott, C. J. Barnhart, e S. M. Benson, «Hydrogen or batteries for grid storage? A net energy analysis», *Energy Environ. Sci.*, vol. 8, n. 7, pp. 1938–1952, 2015.
- [69] F. Perdu, «Overview of existing and innovative batteries - Impact of the storage on the renewable electricity life cycle». [Em linha]. Disponível em: http://science-and-energy.org/wp-content/uploads/2016/03/FPerdu_Houches_final-1.pdf. [Acedido: 19-Nov-2016].
- [70] S. M. Lukic, J. Cao, R. C. Bansal, F. Rodriguez, e A. Emadi, «Energy storage systems for automotive applications», *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, n. 6, pp. 2258–2267, 2008.
- [71] A. Fin, «Where Will Oil Prices be in 2020?», *OilPrice.com*, 2016. [Em linha]. Disponível em: <http://oilprice.com/Energy/Oil-Prices/Where-Will-Oil-Prices-be-in-2020.html>. [Acedido: 17-Out-2016].
- [72] B. Nykvist e M. Nilsson, «Rapidly falling costs of battery packs for electric vehicles», *Nat. Clim. Chang.*, vol. 5, pp. 329–332, 2015.
- [73] R. Hensley, J. Newman, e M. Rogers, «Battery Technology Charges Ahead(nicht benutzen)», n. July, 2012.
- [74] «Oil Price: Latest Price & Chart for Crude Oil - NASDAQ.com». [Em linha]. Disponível em: <http://www.nasdaq.com/markets/crude-oil.aspx>. [Acedido: 17-Out-2016].
- [75] C. . Chan, «The State of the Art of Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles», *Proc. IEEE*, vol. 95, n. 4, 2007.
- [76] «Hybrid Air: An innovative full-hybrid petrol solution for the car of the future», *Groupe PSA*, 2016. [Em linha]. Disponível em: <https://www.groupe-psa.com/en/newsroom/automotive-innovation/hybrid-air/>. [Acedido: 21-Set-2016].
- [77] E. Florez e M. Adolph, «Batteries for portable ICT devices», n. March 2010, pp. 1–7, 2010.

- [78] R. Naam, «How cheap can energy storage get?», *Economic Trends of New Technologies*, 2014. [Em linha]. Disponível em: <http://rameznaam.com/2015/10/14/how-cheap-can-energy-storage-get/>. [Acedido: 23-Out-2016].
- [79] D. Bank, «F.I.T.T. for investors Crossing the Chasm», 2015.
- [80] L. Gil, M. H. Andrade, e M. do C. Costa, «Os TRL como ferramenta na avaliação tecnológica», *Revista Ingenium*. pp. 94–96, 2014.
- [81] K. Park, D. Shin, e E. S. Yoon, «The cost of energy analysis and energy planning for emerging, fossil fuel power plants based on the climate change scenarios», *Energy*, vol. 36, n. 5, pp. 3606–3612, 2011.
- [82] Y. Kim, J. Koh, Q. Xie, Y. Wang, N. Chang, e M. Pedram, «A scalable and flexible hybrid energy storage system design and implementation», *J. Power Sources*, vol. 255, pp. 410–422, 2014.
- [83] A. Bondi, «Characteristics of Scalability and Their Impact on Performance», *Proc. 2nd Int. Work. Softw. Perform.*, pp. 195–203, 2000.
- [84] «Escalabilidade: o que é, para que serve, por que ter - Bizstart». [Em linha]. Disponível em: <http://bizstart.com.br/escalabilidade-o-que-e-para-que-serve-por-que-ter/>. [Acedido: 30-Mai-2016].
- [85] K. Wang *et al.*, «Lithium–antimony–lead liquid metal battery for grid-level energy storage», *Nature*, vol. 514, 2014.
- [86] D. C. Drummond, «Replicability is not reproducibility: Nor is it good science», *Proc. Eval. Methods Mach. Learn. Work. 26th Int. Conf. Mach. Learn.*, n. 2005, pp. 1–4, 2009.
- [87] I. Buchmann, «Charge methods: charging at high or low temperatures», *Battery University*. [Em linha]. Disponível em: http://batteryuniversity.com/learn/article/charging_at_high_and_low_temperatures.
- [88] C. Zhang, T. S. Zhao, Q. Xu, L. An, e G. Zhao, «Effects of operating temperature on the performance of vanadium redox flow batteries», *Appl. Energy*, vol. 155, n. October 2015, pp. 349–353, 2015.
- [89] ActivePower, «Why Flywheel?» [Em linha]. Disponível em: <http://www.activepower.com/why-flywheel/>. [Acedido: 28-Out-2016].
- [90] A. Arora e A. Gambardella, «The changing technology of technological change: general and abstract knowledge and the division of innovative labour», *Research Policy - Special Issue in Honor of Nathan Rosenberg*, 1994. [Em linha]. Disponível em: [http://www.compilerpress.ca/Competitiveness/Anno/Anno Arora & Gambardella changing technology RP 1994.htm](http://www.compilerpress.ca/Competitiveness/Anno/Anno%20Arora%20&%20Gambardella%20changing%20technology%20RP%201994.htm). [Acedido: 01-Jan-2016].
- [91] D. Connolly, «Review of Energy Storage Technologies», 2010.
- [92] S. S. Zhang, «Liquid electrolyte lithium/sulfur battery: Fundamental chemistry, problems, and solutions», *J. Power Sources*, vol. 231, pp. 153–162, 2013.
- [93] A. Manthiram, Y. Fu, e Y.-S. Su, «Challenges and Prospects of Lithium–Sulfur Batteries», *Acc. Chem. Res.*, vol. 46, n. 5, pp. 1125–1134, 2013.
- [94] P. Van den Bossche, F. Vergels, J. Van Mierlo, J. Matheys, e W. Van Autenboer, «SUBAT: An assessment of sustainable battery technology», *J. Power Sources*, vol. 162, n. 2 SPEC. ISS., pp. 913–919, 2006.
- [95] L. F. Nazar, M. Cuisinier, e Q. Pang, «Lithium-sulfur batteries», *MRS Bull.*, vol. 39, 2014.
- [96] G. Girishkumar, B. McCloskey, A. C. Luntz, S. Swanson, e W. Wilcke, «Lithium-air

- battery: Promise and challenges», *J. Phys. Chem. Lett.*, vol. 1, n. 14, pp. 2193–2203, 2010.
- [97] A. Kraytsberg e Y. Ein-Eli, «Review on Li-air batteries - Opportunities, limitations and perspective», *J. Power Sources*, 2011.
- [98] C. M. Oldenburg e L. Pan, «Porous Media Compressed Air Energy Storage: Theory and Simulation of the Coupled Wellbore-Reservoir System», *J. Chem. Inf. Model.*, vol. 53, n. 9, pp. 1689–1699, 2013.
- [99] J. K. Fremerey, «Axially stabilized magnetic bearing having a permanently magnetized radial bearing», 1992.
- [100] T. Sasaki, Y. Ukyo, e P. Novák, «Memory effect in a lithium-ion battery», *Nat. Mater.*, vol. 12, pp. 569–575, 2013.
- [101] P. Thounthong, V. Chunkag, P. Sethakul, B. Davat, e M. Hinaje, «Comparative study of fuel-cell vehicle hybridization with battery or supercapacitor storage device», *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 58, n. 8, pp. 3892–3904, 2009.
- [102] J. Torreglosa, P. Garcia, L. Fernandez, e F. Jurado, «Predictive Control for the Energy Management of a Fuel Cell-Battery-Supercapacitor Tramway», *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 10, n. 1, pp. 1–1, 2013.
- [103] Lazard, «Lazard's levelized cost of energy analysis—version 8.0», n. September, p. 20, 2014.
- [104] T. E. Lipman, J. L. Edwards, e D. M. Kammen, «Fuel cell system economics: Comparing the costs of generating power with stationary and motor vehicle PEM fuel cell systems», *Energy Policy*, vol. 32, n. 1, pp. 101–125, 2004.
- [105] J. Lee, S. Hun Shin, J. Ki Lee, S. Choi, e J. Hyun Kim, «Corrosion behavior of surface treated steel in liquid sodium negative electrode of liquid metal battery», 2016.
- [106] «What is Mixed Potential? - Definition from Corrosionpedia». [Em linha]. Disponível em: <https://www.corrosionpedia.com/definition/784/mixed-potential>. [Acedido: 22-Mar-2016].

Anexos

A.1: Características operacionais utilizadas

Densidade de energia e energia específica

É definida como a capacidade de energia por unidade de volume ou peso da bateria respetivamente. A densidade de energia é medida em Wh/L e a energia específica é medida em Wh/kg. A energia específica é especialmente importante para a escolha de baterias para veículos elétricos

Densidade de potência e potência específica

A densidade de potência e potência específica são a quantidade de potência que existe por unidade de volume e massa respetivamente.

Observações: Alguns sistemas (por exemplo, sistemas eletroquímicos) têm uma energia específica muito boa, mas uma potência específica muito baixa. Isto significa que estes sistemas armazenam uma grande quantidade de energia mas apenas a conseguem libertar lentamente – característica que pode ser favorecida em alguns campos de aplicação.

Uma elevada densidade de potência normalmente resulta numa baixa densidade de energia para qualquer sistema: se a energia for retirada da bateria rapidamente (densidade de potencia elevada) a energia disponível será reduzida.

Capacidade de armazenamento

A capacidade de armazenamento está associada à quantidade de energia que está disponível no sistema de armazenamento depois deste se encontrar carregado. No entanto é de notar que nem toda esta energia pode ser livremente utilizada; o desempenho de certos sistemas de armazenamento pode ser afetado pela profundidade de descarga. A energia total armazenada é sempre igual ou superior à energia total disponível para utilização.

Capacidade de potência

A potência é no geral definida como sendo a quantidade de energia que é possível de libertar por unidade de tempo. Assim, a capacidade de potência pode ser vista como a quantidade máxima de energia que o sistema consegue libertar ou armazenar por unidade de tempo.

Auto-descarga

Quantidade de energia perdida pela bateria num determinado período de tempo mesmo quando esta não se encontra em funcionamento. É expressa em percentagem. No entanto para determinados sistemas existe dificuldade em medir de forma exata este parâmetro, pelo que, para tais casos avalia-se como sendo muito baixa, baixa, elevada, etc.

Tempo de descarga

O armazenamento de energia é em geral um processo lento. No entanto, a libertação da energia armazenada pode ter que ocorrer de forma muito rápida. É denominado tempo de descarga o tempo que é necessário para libertar a energia armazenada num sistema totalmente carregado, sendo que esta energia é libertada à potência máxima. A potência de descarga está, em alguns casos, limitada a uma taxa de transmissão de potência máxima devido a certas limitações dos equipamentos [3] .

Tempo de vida (anos)

Número de anos que a unidade de armazenamento consegue funcionar sem que as suas características sejam afetadas pelo estado de degradação do sistema ou das suas componentes

Número de ciclos

Refere-se ao número de vezes que a unidade de armazenamento pode libertar o nível de energia para a qual foi projetada.

Mobilidade e portabilidade

Define-se como sistema móvel aquele que é transportável e que pode funcionar com o movimento do dispositivo em que está inserido. É uma característica especialmente importante para o armazenamento de energia em veículos. Esta característica não deve ser confundida com portabilidade; a portabilidade de um sistema de armazenamento indica um nível de mobilidade mais avançado em que é possível a movimentação total do dispositivo em que o sistema de armazenamento se encontra sem que isto comprometa o desempenho quer do sistema de armazenamento quer do dispositivo.

Custos

Os custos são divididos em:

Custo de investimento (capital) – é o custo total da obtenção da tecnologia. Pode ser expresso em €/MWh ou €/MW dependendo da relevância de cada parâmetro para o campo de aplicação.

Custos de operação e manutenção (O&M) – são os custos que existem na operação do sistema e a sua manutenção. Expressos em €/MW/ano ou €/MW conforme relevante para a tecnologia.

Custo nivelado de eletricidade - o custo estimado por MWh armazenado, sem subsídios, da construção e do funcionamento de um sistema ao longo do seu período calculado de vida.

A.2: Outras baterias eletroquímicas

Baterias de fluxo redox de vanádio

Estas baterias operam à temperatura ambiente. Além da sua resposta rápida, têm uma vida útil de 5-10 anos e poderão chegar a ter cerca de mais de 12 000 ciclos de carga/descarga profunda dependendo do tipo de aplicação. Uma das suas maiores vantagens é o facto de não possuírem profundidade de descarga. Podendo ser descarregada completamente sem que isso diminua a sua performance [3], [39]. A sua densidade energética varia entre 16-33Wh/L. Dentro das baterias de fluxo é das que possui melhor eficiência estando entre 78 a 80% [57].

Uma das mais consideráveis desvantagens deste tipo de baterias é a sua baixa densidade de energia – cada célula tem uma tensão de 1.2V, exigindo assim um maior número de células para que seja possível obter uma potência de saída comparável a outras baterias de fluxo. Apesar da sua versatilidade, estas baterias são demasiado complexas para aplicações de pequena escala onde é permitida uma potência relativamente baixa (e.g. bombas, unidades de controlo, sensores, etc.).

Baterias de fluxo zinco-bromo

Estas baterias funcionam a temperaturas entre os 20°C e os 50°C. Uma das suas grandes vantagens é, tal como nas baterias de fluxo redox de vanádio, a ausência de efeito de memória, i.e. não há efeitos na performance da bateria quando esta é descarregada completamente. A sua eficiência é de 75% tendo uma densidade de energia mais elevada que o sistema de vanádio podendo atingir os 75Wh/L[4].

No entanto, os ciclos de vida desta bateria são limitados (2000 ciclos) devido à degradação da membrana de separação durante a operação[91].

Baterias de fluxo polissulfeto de brometo

As baterias de polissulfeto de brometo operam entre as temperaturas 20°C e 40°C tendo um número de ciclos de vida aproximado ao das baterias de zinco-bromo (i.e. 2000 ciclos) dependendo do tipo de utilização. Tal como as baterias redox de vanádio, as baterias de polissulfeto de brometo possuem um tempo de resposta bastante curto [91]. A sua eficiência é mais baixa (entre 60 a 75%), no entanto o seu tempo de vida é de aproximadamente 15 anos [57].

Devido à reacção química que ocorre nesta bateria, são produzidas pequenas quantidades de brometo, hidrogénio e cristais de sulfato de sódio. Consequentemente, é necessária uma manutenção frequente para retirar tais compostos, o que se torna uma desvantagem relativamente às restantes baterias de fluxo mencionadas.

Baterias de lítio-enxofre

Estas baterias são um tipo promissor de bateria recarregável, reconhecida pela sua elevada densidade energética [92]. Estas baterias poderão vir a substituir as baterias de ião de lítio pelo facto de possuírem uma densidade energética mais elevada e um custo mais reduzido por reduzir a utilização de lítio [93].

Dentro de uma célula de bateria de ião de lítio há espaço que é utilizado por um eléctrodo com uma camada de grafite cuja função é alojar os iões de lítio. Uma das características mais atrativas das baterias Li-S, além do uso de materiais muito baratos e abundantes na natureza, é a inexistência desta camada de grafite[94] e [95]. Assim, a grafite é substituída por metal de lítio puro tornando-se não só o fornecedor de iões lítio mas também o próprio eléctrodo da célula, encolhendo o seu tamanho quando a bateria está a descarregar e aumentando novamente quando a bateria é

recarregada [94]. O metal oxidado é posteriormente substituído por enxofre. Assim sendo, esta tecnologia possui uma vantagem não só económica, mas também no seu peso[94].

Uma das suas maiores desvantagens desta tecnologia é a reação entre o lítio e o enxofre. Ao longo dos ciclos da bateria, compostos solúveis Li-S podem infiltrar-se no eletrólito degradando os elétrodos da bateria. Apesar de existirem maneiras de eliminar este efeito quase na totalidade, há investigadores que ainda duvidam do possível sucesso comercial destas baterias[94].

Baterias metal-ar

Existem diversos tipos de baterias metal ar. No entanto, apesar de serem utilizadas para diferentes aplicações, possuem vantagens e desvantagens semelhantes.

No que toca a vantagens, é importante notar que estas baterias têm uma densidade energética elevada, elevado tempo de vida, baixo custo e uma capacidade independente da resistência. As maiores desvantagens são essencialmente a sua dependência das condições ambiente, possível corrosão e potência limitada. É ainda importante mencionar que, quando dentro dos limites de operação, o desempenho destas baterias é totalmente independente da temperatura. No entanto, o limite de temperatura de operação destas baterias é baixo, a partir do qual o seu desempenho fica comprometido [39].

Dentro das baterias de metal-ar, a bateria de lítio-ar é das mais conhecidas e exploradas especialmente pelo uso do famoso lítio. Explicado de uma forma simples, esta bateria utiliza a oxidação do lítio no ânodo e a redução do oxigénio no cátodo para induzir corrente elétrica. Há duas variantes desta bateria – a forma aquosa e a forma não aquosa, onde ambas oferecem uma capacidade de armazenamento de energia significativamente superior às baterias de ião de lítio [96].

Uma das suas características mais atrativas é o facto de utilizar a reação entre um elétrodo de lítio e outro de oxigénio que, teoricamente, levaria à mais alta densidade de energia de entre todas as baterias, e comparável à da gasolina [96]. No entanto, apesar da sua elevada densidade de energia, ela apresenta uma densidade de potência reduzida. Além disto, a sua tensão de carga é consideravelmente mais elevada que a tensão de descarga, resultando assim numa baixa eficiência de energia de ciclo elétrico (i.e. ~60-70%). O seu número de ciclos é reduzido sendo a capacidade dependente desta (diminui duas vezes por cada 50 ciclos) [97]; facto que poderá vir a ser considerado irrelevante devido à sua elevada densidade de energia [96] .

Atualmente, estas baterias ainda se encontram em desenvolvimento, sendo ainda recentes para conclusões acerca do seu papel no futuro do armazenamento de energia, embora se saiba que as suas características são desejáveis para veículos elétricos[97]. No entanto, a nível prático ainda não foi possível alcançar a meta dos seus valores teóricos. Em teoria deveria ser possível atingir a tensão de 3.35V em circuito aberto. No entanto, a nível prático isto não acontece apresentando-se uma tensão de aproximadamente 2.85V em circuito aberto. Esta diferença deve-se essencialmente ao facto do ânodo e o cátodo exibirem potenciais mistos¹⁹ [39].

¹⁹ Quando se fala em potenciais mistos refere-se essencialmente ao potencial efetivo de uma superfície metálica com um eletrólito que causa corrosão eletroquímica. Esta teoria, conhecida como a teoria dos potenciais mistos, explica a corrosão no metal como reação de dois (ou mais) elétrodos a trabalhar em simultâneo na interface da superfície do metal e eletrólito[105, 106].

A.3: ESOI da bateria de metal líquido para diferentes cenários

Expressão para cálculo: $ESOI = \frac{\gamma \eta \times DoD}{\varepsilon_e}$

Dados da bateria: $\gamma = 100000$, $\eta = 0.7$, DoD assumido como 0.8.

Tipo de produção		Eólica	Solar
Estimativa ε_e	ESOI	ESOI/EROI _g	ESOI/EROI _g
100	490.00	5.70	61.25
150	326.67	3.80	40.83
200	245.00	2.85	30.63
250	196.00	2.28	24.50
300	163.33	1.90	20.42
350	140.00	1.63	17.50
400	122.50	1.42	15.31
450	108.89	1.27	13.61
500	98.00	1.14	12.25
550	89.09	1.04	11.14
600	81.67	0.95	10.21
650	75.38	0.88	9.42
700	70.00	0.81	8.75
750	65.33	0.76	8.17
800	61.25	0.71	7.66
850	57.65	0.67	7.21
900	54.44	0.63	6.81
950	51.58	0.60	6.45
1000	49.00	0.57	6.13
1050	46.67	0.54	5.83
1100	44.55	0.52	5.57

Nota: a vermelho valores de custo de produção muito elevados para que seja viável o armazenamento para energia eólica.

Valores de referência de outras baterias eletroquímicas (para comparação)

Tecnologia	η	γ	DoD	ε_e
lão de lítio	0.97	6000	80	136
NaS	0.90	4500	80	146
Fluxo	0.85	13000	100	208

A.4: ESOI da tecnologia SMES para diferentes cenários

Expressão para cálculo: $ESOI = \frac{\gamma \eta \times DoD}{\varepsilon_e}$

Dados da bateria: $\gamma = 100000$, $\eta = 0.97$, DoD assumido como 0.8.

Tipo de produção		Eólica	Solar
Estimativa ε_e	ESOI	ESOI/EROI _g	ESOI/EROI _g
100	784.00	9.12	98.00
150	522.67	6.08	65.33
200	392.00	4.56	49.00
250	313.60	3.65	39.20
300	261.33	3.04	32.67
350	224.00	2.60	28.00
400	196.00	2.28	24.50
450	174.22	2.03	21.78
500	156.80	1.82	19.60
550	142.55	1.66	17.82
600	130.67	1.52	16.33
650	120.62	1.40	15.08
700	112.00	1.30	14.00
750	104.53	1.22	13.07
800	98.00	1.14	12.25
850	92.24	1.07	11.53
900	87.11	1.01	10.89
950	82.53	0.96	10.32
1000	78.40	0.91	9.80
1050	74.67	0.87	9.33
1100	71.27	0.83	8.91

Nota: a vermelho valores de custo de produção muito elevados para que seja viável o armazenamento para energia eólica.